

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Coordenação de Isolamentos em Linhas Aéreas de AT e MAT

Vitor Diogo da Silva Almeida

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Fevereiro de 2013

Resumo

A presente dissertação, tem como principal objetivo o estudo das metodologias nacionais, de dimensionamento da coordenação de isolamento e comparação, das mesmas, com os procedimentos internacionais. Através desse estudo, pretende-se diminuir o atravancamento das linhas aéreas, de alta e muito alta tensão. A visão nacional é dada pelo guia de coordenação de isolamento da REN e a internacional pela norma 60071-2, da CEI.

É realizada uma comparação, entre a norma CEI 60071-1 e a IEEE C62.82.1, de forma a apurar a existência de diferenças consideráveis, entre a normalização internacional. Apesar de seguirem diferentes etapas, a metodologia geral é muito similar. A CEI apresenta-se de uma forma mais esquemática, facilitando a automatização do processo.

Da análise, entre o guia e a norma 60071-2, conclui-se que a REN apresenta distâncias de isolamento muito conservadoras, relativamente à CEI. As diferenças encontradas são indício da possibilidade de compactação dos apoios e consequentemente das linhas. Durante a análise, são comparadas as classes de sobretensões consideradas, as tensões de disrupção dos intervalos de ar, o método determinístico e estatístico. No fim, são validados os resultados obtidos através da comparação com a normalização EN 50341-3-17.

A dissertação é finalizada, com o estudo de compactação de seis apoios. Esses apoios são os mais utilizados, pela REN, para linhas simples e duplas com tensão nominal de 150, 220 e 400 kV. O estudo resulta na diminuição das dimensões de todos os apoios, verificando-se reduções entre os 8 e 43%. Os apoios foram compactados, de forma a permitir a execução de trabalhos em tensão e verificou-se que o desempenho das linhas, face a descargas atmosféricas, é melhorado.

Palavras-Chave: Coordenação de isolamento, Linhas aéreas, Solicitações dielétricas, Fatores de intervalo, Tensão de disrupção, Método estatístico, Método determinístico, Risco de falha, Distâncias de isolamento, Compactação de linhas aéreas.

Abstract

The present dissertation, has as main objective the study of Portuguese methodologies for insulation coordination design and comparison, of them, with international procedures. Being thus possible, study the chance of overhead transmission lines compaction. The Portuguese vision is given by the insulation coordination guide, of REN, while the international view is given by 60071-2 standard, of International Electrotechnical Commission.

Standards 60071-1 and C82.62.1, of International Electrotechnical Commission and IEEE respectively, are compared. With the purpose to ascertain if there are considerable differences, between international standardization. They follow different steps, but the overall approach is very similar. The CEI is more schematic, facilitating the process automation.

The analysis between the guide and standard 60071-2, shows that REN insulation distances are very conservative, relative to CEI. The differences are evidence of the possibility of compacting the towers and lines, consequently. During the analysis, the overvoltage classes, voltage disruption of air gaps, statistical and deterministic method are compared. In the end, the results are validated by comparison with standard EN 50341-3-17.

The dissertation ends with a study of compaction, of six towers. These towers are the most used by REN, for single and double lines with a nominal voltage of 150, 220 and 400 kV. The study, results on the dimension reduction of all towers, verifying cuts between 8 and 43%. The supports were compacted in order to allow execution of works in tension and it was found that the performance of lines, against lightning, are improved.

Keywords: *Insulation coordination, Overhead lines, Voltage stresses, Gap factors, Voltage disruption, Statistical method, Deterministic method, Risk of failure, Insulation coordination distances, Overhead lines compaction.*

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação, não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas. Não poderia deixar de demonstrar o meu apreço, para com as mesmas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à pessoa que mais de perto seguiu este trabalho. Essa pessoa, é o Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura, orientador e supervisor desta dissertação. Obrigado, por toda a disponibilidade, conselhos, orientações e motivação que forneceu durante este período. Agradeço também, pelo contributo que deu durante a minha formação académica. Onde, através da motivação, conhecimento e conduta, teve especial importância na escolha de áreas de formação e especialização.

Aos Engenheiros da REN, Reis Rodrigues, Matos Fernandes, Luís Perro, Manuel Severina e Campos Pinto, agradeço pela orientação, aconselhamento e esclarecimentos fornecidos.

Aos Engenheiros José Figueiredo e José Peralta, da REN, agradeço pela disponibilidade e pelo fornecimento de dados.

Ao Engenheiro Albertino Meneses da REN, agradeço pelo aconselhamento e pela ajuda dada.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais, à minha irmã e à minha namorada pelo especial contributo dado, durante este período e durante todo o meu percurso académico. Sem toda a compreensão, motivação, alento e orgulho que depositaram em mim, era impossível construir todo este caminho. Por tudo isso dedico-lhes este trabalho, em forma de agradecimento.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Motivação e Objetivos	1
1.2. Estrutura da Dissertação	2
2. Revisão da Literatura	5
2.1. Introdução ao Tema	5
2.2. Filosofia	6
2.3. Métodos Convencionais e Estatísticos.....	6
2.3.1. Formulação do Risco de Cedência de um Isolamento	7
2.4. Equipamento de Proteção contra Sobretensões	9
2.4.1. Hastes de Guarda	9
2.4.2. Descarregador de Sobretensões	11
2.4.3. Cabos de Guarda	13
2.4.4. Isoladores.....	13
2.5. Realização da Coordenação de Isolamento	14
3. Normas de Coordenação de Isolamento	15
3.1. CEI 60071.....	15
3.1.1. Determinação das Tensões e Sobretensões Representativas (<i>U_{rp}</i>)	16
3.1.2. Determinação das Tensões Suportáveis de Coordenação (<i>U_{cw}</i>)	17
3.1.3. Determinação da Tensão Suportável Requerida (<i>U_{rw}</i>).....	18
3.1.4. Determinação das Tensões Suportáveis Padrão (<i>U_w</i>)	19
3.2. IEEE C62.82.1	19
3.2.1. Determinação dos Esforços Dielétricos	20
3.2.2. Comparação entre Sobretensões e Suportabilidade Dielétrica	20

3.2.3. Seleção do Nível de Isolamento Padrão	21
3.2.4. Seleção do Nível Padrão de Isolamento do Equipamento	22
3.3. Comparação das Normas.....	22
4. Coordenação de Isolamento Aplicada em Linhas Aéreas	25
4.1. Solicitações Dielétricas.....	25
4.1.1. Regime Permanente	26
4.1.2. Sobreensões Temporárias	26
4.1.3. Sobreensões de Frente Lenta (Manobra)	28
4.1.4. Sobreensões de Frente Rápida (Atmosférica).....	29
4.1.5. Sobreensão de Frente Muito Rápida	30
4.2. Tensão Suportável de Coordenação.....	30
4.2.1. Suportabilidade Dielétrica do Isolamento.....	30
4.2.2. Probabilidade de Descarga Disruptiva do Isolamento	31
4.2.3. Cálculo das Tensões de Descarga dos Intervalos de Ar	33
4.2.4. Análise das Tensões de Descarga dos Intervalos de Ar	39
4.2.5. Critério de Desempenho	41
4.3. Procedimentos para Coordenação de Isolamento	41
4.3.1. Método Determinístico	42
4.3.2. Método Estatístico	43
4.3.3. Risco de Falha do Isolamento.....	45
4.4. Tensão Suportável Requerida.....	49
4.4.1. Correção de Altitude.....	49
4.4.2. Fator de Segurança.....	50
4.5. Distâncias no Ar.....	50
4.5.1. Cadeia de Isoladores	51
4.5.2. Hastes de Guarda	52
4.5.3. Distância entre Peças em Tensão e Apoio	55
4.5.4. Distância entre Condutores.....	57
4.5.5. Distância entre Condutores e Cabos de Guarda	59
4.6. Análise das Distâncias Mínimas.....	60
4.6.1. Distância entre Peças em Tensão e Apoio	60

4.6.2. Distâncias entre Condutores.....	61
4.7. Conclusão.....	61
5. Compactação de Linhas Aéreas de Transporte	63
5.1. Apoios Utilizados pela REN	63
5.2. Trabalhos em Tensão	65
5.3. Proposta de Compactação.....	67
5.3.1. Linhas com Tensão Nominal de 150 kV	67
5.3.2. Linhas com Tensão Nominal de 220 kV	70
5.3.3. Linhas com Tensão Nominal de 400 kV	72
5.4. Análise do Desempenho face a Descargas Atmosféricas	75
5.5. Conclusão.....	77
6. Conclusão e Trabalhos Futuros.....	79
6.1. Conclusões.....	79
6.2. Trabalhos Futuros	81
Referências	83
Anexos	85
Anexo 1: Norma CEI 60071-1	85
A1.1 Classes e Formas de Onda Padrão para Tensões e Sobretensões	85
A1.2 Exponente m para Correção de Altitude.....	86
A1.3 Valores Normalizados para as Tensões Suportáveis Nominais de Curta Duração à Frequência Industrial.....	86
A1.4 Valores Normalizados para as Tensões Suportáveis Nominais de Impulso	86
A1.5 Nível de Isolamento Padrão para Classe I	87
A1.6 Nível de Isolamento Padrão para Classe II	88
A1.7 Distâncias no Ar	89
Anexo 2: Norma IEEE C62.82.1	91
A2.1 Formas de Onda Padrão.....	91
A2.2 Correção de Altitude	92
A2.3 Tensões Suportáveis Normalizadas de Baixa Frequência e Curta Duração	93
A2.4 Valores Normalizados para BIL e BSL	93
A2.5 Tensões Suportáveis Padrão.....	93
Anexo 3: Apoios Utilizados pela REN	95

A3.1	Tipo FS – Linha Simples	95
A3.2	Tipo CWS – Linha Dupla.....	96
A3.3	Tipo MT1 – Linha Simples.....	97
A3.4	Tipo QS – Linha Simples.....	98
A3.5	Tipo DLS – Linha Dupla	99

Lista de figuras

Figura 2.1 – Probabilidade de ocorrência de uma sobretensão, entre U' e $U' + \partial U$.	7
Figura 2.2 – Probabilidade acumulada do comportamento de um dado isolamento, quando sujeito a uma sobretensão de valor U' .	8
Figura 2.3 – Probabilidade de cedência do isolamento a uma sobretensão de valor U .	8
Figura 2.4 – Cadeia de Isoladores com haste de guarda regulável [2].	11
Figura 2.5 – Constituição e característica tensão-corrente dos descarregadores de sobretensões de carboneto de silício [2].	12
Figura 2.6 – Comportamento do descarregador de sobretensões de óxido de zinco [2].	12
Figura 2.7 – Constituição e característica tensão-corrente dos descarregadores de sobretensões de óxido de zinco [2].	13
Figura 3.1 – Diagrama do procedimento para coordenação de isolamento, apresentado pela CEI [5].	16
Figura 4.1 – Variação de probabilidade da função de Weibull e de Gauss [7].	33
Figura 4.2 – Comparação das tensões de disrupção dos intervalos de ar, em regime permanente.	36
Figura 4.3 – Comparação das tensões de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente lenta.	37
Figura 4.4 – Comparação das tensões de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente rápida.	39
Figura 4.5 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, em regime permanente e configuração condutor-apoio.	39
Figura 4.6 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, em regime permanente e configuração condutor-janela.	39
Figura 4.7 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente lenta e configuração condutor-apoio.	40
Figura 4.8 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente lenta e configuração condutor-janela.	40
Figura 4.9 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente rápida e configuração condutor-apoio.	40

Figura 4.10 – Comparação da tensão de ruptura dos intervalos de ar, para sobretensões de frente rápida e configuração condutor-janela.....	41
Figura 4.11 – Avaliação do fator de coordenação determinístico, kcd [7].....	42
Figura 4.12 – Relação entre risco de falha e fator estatístico, REN [12].	44
Figura 4.13 – Relação entre risco de falha e fator estatístico, CEI [7].	45
Figura 4.14 – Probabilidade de descarga de um isolamento, $U_{50} = 1$; $\sigma = 6\%$	46
Figura 4.15 – Probabilidade de descarga de um isolamento, $U_{50} = 2,5$; $\sigma = 6\%$	46
Figura 4.16 – Risco de falha de um isolamento, CEI e REN. $U_{50} = 1$; $\sigma = 6\%$; $\mu u = 1,5$; $\sigma u = 0,5$	47
Figura 4.17 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 1$; $\sigma = 6\%$; $\mu u = 1,5$; $\sigma u = 0,5$	47
Figura 4.18 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 2,5$; $\sigma = 6\%$; $\mu u = 1,5$; $\sigma u = 0,5$	48
Figura 4.19 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 1,5$; $\sigma = 6\%$; $\mu u = 1,5$; $\sigma u = 0,5$	48
Figura 4.20 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 1,5$; $\sigma = 12\%$; $\mu u = 1,5$; $\sigma u = 0,5$. ..	49
Figura 5.1 – Comparação das distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio FS, $U_N=150\text{kV}$	67
Figura 5.2 – Proposta de compactação do apoio FS, $U_N=150\text{kV}$, em milímetros.....	68
Figura 5.3 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio CWS, $U_N=150\text{kV}$	69
Figura 5.4 – Proposta de compactação do apoio CWS, $U_N=150\text{kV}$, em milímetros.....	69
Figura 5.5 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio MT1, $U_N=220\text{kV}$	70
Figura 5.6 – Proposta de compactação do apoio MT1, $U_N=220\text{kV}$, em milímetros.....	71
Figura 5.7 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio CWS, $U_N=220\text{kV}$	71
Figura 5.8 – Proposta de compactação do apoio CWS, $U_N=220\text{kV}$, em milímetros.....	72
Figura 5.9 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio QS, $U_N=400\text{kV}$	73
Figura 5.10 – Proposta de compactação do apoio QS, $U_N=400\text{kV}$, em milímetros.....	73
Figura 5.11 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio DLS, $U_N=400\text{kV}$	74
Figura 5.12 – Proposta de compactação do apoio DLS, $U_N=400\text{kV}$, em milímetros.	75
Figura 5.13 – Comparação do desempenho face a descargas atmosféricas, entre apoio base e apoio compacto.	76
Figura A. 1 – Classes e formas de sobretensões, formas de tensão padrão e testes de tensão suportável padrão [5].	85
Figura A. 2 – Dependência do expoente m na tensão suportável do impulso de manobra [7].	86
Figura A. 3 – Níveis de isolamento padrão para a classe I ($1\text{kV} < U_m < 245\text{kV}$) [5].	87
Figura A. 4 – Níveis de isolamento padrão para a classe II ($U_m > 245\text{kV}$) [5].	88
Figura A. 5 – Correlação entre tensões suportáveis ao impulso atmosférico padrão e distâncias mínimas no ar [6].	89

Figura A. 6 – Correlação entre tensões suportáveis ao impulso de manobra padrão e distâncias mínimas, fase-terra, no ar [6].	90
Figura A. 7 – Correlação entre tensões suportáveis ao impulso de manobra padrão e distâncias mínimas, fase-fase, no ar [6].	90
Figura A. 8 – Sobretensão de origem atmosférica ($Tr = 0.1 - 20 \mu s$, $Th < 300 \mu s$) [9].	91
Figura A. 9 – Sobretensão de manobra ($Tr = 20 - 5000 \mu s$, $Th < 20000 \mu s$) [9].	91
Figura A. 10 – Sobretensão de curta duração, de frente muito rápida ($Tr = 3 - 100 ns$, $Th < 3 ms$, $f1 = 0.3 - 100 MHz$, $f2 = 30 - 300 kHz$) [9].	91
Figura A. 11 – Parâmetro k como função de h/δ [11].	92
Figura A. 12 – Valores do expoente m em função de g [11].	92
Figura A. 13 – Tensões suportáveis padrão para a classe I [9].	93
Figura A. 14 – Tensões suportáveis padrão para a classe II [9].	94
Figura A. 15 – Dimensões em milímetros do apoio FS, suspensão em triângulo, para linha simples [17].	95
Figura A. 16 – Dimensões em milímetros do apoio CWS, suspensão em esteira vertical, para linha dupla [15].	96
Figura A. 17 – Dimensões em milímetros do apoio MT1, suspensão em esteira horizontal, para linha simples [18].	97
Figura A. 18 – Dimensões em milímetros do apoio QS, suspensão em esteira horizontal, para linha simples [19].	98
Figura A. 19 – Dimensões em milímetros do apoio DLS, suspensão em esteira vertical, para linha dupla [16].	99

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Valores de 2% da sobretensão de frente lenta, para a ligação de linhas.	28
Tabela 4.2 – Valores de 2% da sobretensão de frente lenta, para religação de linhas.	28
Tabela 4.3 – Fatores de intervalo para solicitações fase-terra, REN e CEI.	34
Tabela 4.4 – Fatores de intervalo para geometrias típicas fase-fase.	35
Tabela 4.5 – Valores do fator de coordenação determinístico, REN e CEI.	43
Tabela 4.6 – Caracterização dos níveis de poluição e linhas de fuga específica [12].	51
Tabela 4.7 – Salinidade suportável dos níveis de poluição [12].	51
Tabela 4.8 – “Tensões suportáveis convencionais” e tensões de descarga disruptiva “certa” para isolamento autorregenerativo [12].	52
Tabela 4.9 – Distância mínima no ar dos dispositivos de guarda, REN [12].	53
Tabela 4.10 – Gama de distâncias entre dispositivos de guarda, REN [12].	53
Tabela 4.11 – Gama de distâncias entre dispositivos de guarda, CEI – Classe II.	54
Tabela 4.12 – Gama de distâncias entre dispositivos de guarda, CEI – Classe I.	54
Tabela 4.13 – Probabilidade de disrupção, dos intervalos de ar, para distâncias mínimas entre hastes – REN.	55
Tabela 4.14 – Distâncias mínimas entre peças em tensão e apoio, REN.	56
Tabela 4.15 – Gama de distâncias entre condutor e apoio, CEI – Classe II.	57
Tabela 4.16 – Gama de distâncias entre condutor e apoio, CEI – Classe I.	57
Tabela 4.17 – Distâncias mínimas entre condutores, REN.	58
Tabela 4.18 – Gama de distâncias entre condutores, CEI – Classe II.	59
Tabela 4.19 – Gama de distâncias entre condutores, CEI – Classe I.	59
Tabela 4.20 – Distâncias entre peças em tensão e apoio, EN 50341-3-17 – Classe II.	60
Tabela 4.21 – Distâncias entre peças em tensão e apoio, EN 50341-3-17 – Classe I.	60
Tabela 4.22 – Distâncias entre peças em tensão e apoio, condutor- janela, EN 50341-3-17...	61
Tabela 4.23 – Distâncias entre condutores, EN 50341-3-17 – Classe II.	61
Tabela 4.24 – Distâncias entre condutores, EN 50341-3-17 – Classe I.	61
Tabela 5.1 – Comprimentos das cadeias de isoladores, considerados.	64
Tabela 5.2 – Distâncias mínimas dos apoios utilizados pela REN.	64
Tabela 5.3 – Distâncias mínimas para executar trabalhos em tensão.	66
Tabela 5.4 – Desempenho face a descargas atmosféricas.	76

Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas

AT	Alta Tensão
MAT	Muito Alta Tensão
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
p.u.	Sistema por unidade
CEI/IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional / <i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
r.m.s.	<i>Root Mean Square</i>
BIL	<i>Basic Lightning Impulse Insulation Level</i>
BSL	<i>Basic Switching Impulse Insulation Level</i>
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia

Lista de Símbolos

k_1	(-)	Fator correção da densidade do ar.
k_a	(-)	Fator de correção de altitude.
k_c	(-)	Fator de coordenação.
k_{cd}	(-)	Fator de coordenação determinístico.
k_{cs}	(-)	Fator de coordenação estatístico.
k_d	(-)	Fator de correção da densidade do ar.
k_h	(-)	Fator de correção da humidade do ar.
k_s	(-)	Fator de segurança.
k_t	(-)	Fator de correção atmosférico.
m_u	(kV)	Valor médio das sobretensões, REN.
U_0	(kV)	Tensão abaixo da qual não existe possibilidade de disrupção, do dielétrico.
U_{10}	(kV)	Tensão para a qual o dielétrico apresenta 10% de probabilidade de disrupção.
U_{16}	(kV)	Tensão para a qual o dielétrico apresenta 16% de probabilidade de disrupção.
U_{50}	(kV)	Tensão para a qual o dielétrico apresenta 50% de probabilidade de disrupção.
U_{cw}	(kV)	Tensão Suportável de Coordenação
U_{e2}	(kV)	Valor de sobretensão fase-terra com 2% de probabilidade de ser excedida.

U_m	(kV)	Tensão mais elevada para o equipamento
U_{ps}	(kV)	Nível de proteção a impulsos de manobra de um descarregador de sobretensão.
U_{rp}	(kV)	Tensão e Sobretensão Representativa
U_{rw}	(kV)	Tensão Suportável Requerida
U_s	(kV)	Tensão mais elevada de um sistema
U_w	(kV)	Tensão Suportável Padrão
V_B	(kV)	Valor, medido ou estimado, de 50% da tensão disruptiva.
γ_c	(-)	Fator de segurança convencional.
σ_u	(kV)	Desvio padrão da distribuição de probabilidade das sobretensões, REN.
k	(-)	Parâmetro em função do rácio entre h e δ .
K, K_+	(-)	Fator de intervalo, aplicado em configurações de intervalos de ar fase-terra.
L	(m)	Caminho mínimo de descarga.
α	(-)	Fator de intervalo, aplicado em configurações de intervalos de ar fase-fase.
γ	(-)	Fator de segurança estatístico.
δ	(-)	Densidade relativa do ar.
σ	(kV)	Desvio padrão da distribuição de probabilidade de descarga disruptiva, REN.
Z	(kV)	Desvio padrão da distribuição de probabilidade de descarga disruptiva, CEI.

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação e Objetivos

A energia elétrica apresenta inúmeras vantagens, que a tornam muito apreciável para vários tipos de aplicação. É um tipo de energia, que pode ser produzida de várias formas e utilizando diferentes fontes de produção. Pode ser obtida através de gás, diesel, carvão, etc. Em Portugal, tem-se assistido a uma expansão da produção através de fontes renováveis, com especial relevo para a energia eólica e solar. Também a energia hídrica, tem especial importância no nosso país, permitindo regular os caudais dos rios assim como armazenar energia, através da bombagem de jusante para montante, nos locais do aproveitamento hidroelétrico.

Nos últimos anos, têm sido claros os efeitos que as emissões de gases de efeito de estufa provocam, no nosso planeta. Como tal, tem-se procurado diminuir a emissão, dos mesmos. Criaram-se assim, preocupações ligadas com a eficiência energética e obtenção de energia através de fontes limpas. Mais uma vez, a energia elétrica, eleva-se perante as outras. Pois, os sistemas elétricos de energia, apresentam-se como sistemas de elevada eficiência, conjugando ainda a possibilidade de produção através de fontes renováveis, tal como já referido. Também os equipamentos, que funcionam através desta energia, possuem elevada eficiência energética e baixa taxa de avarias, o que leva a uma menor poluição devida à produção de peças de substituição. Pode-se então afirmar que, a energia elétrica, é o caminho a seguir para que a Humanidade continue a sua evolução, de forma sustentável.

Apesar das vantagens, apresenta o inconveniente da necessidade de transporte, desde o local de produção até ao local de consumo. Sendo assim, necessário criar infraestruturas de transporte e distribuição. Com o crescimento do consumo, este sistema, expandiu-se de forma a fazer chegar a energia aos consumidores, transformando-se num complexo sistema, designado por sistema elétrico de energia. O qual, é constituído por linhas aéreas, subterrâneas e subestações.

O sistema elétrico de energia, tem impacto direto sobre o preço final da eletricidade. Logo, todo e qualquer gasto com a criação de novas infraestruturas, expansão, manutenção e substituição, das já existentes, tem de ser realizado da forma mais eficiente possível. Especialmente, quando existem restrições económicas como as que se verificam atualmente. Pois, a energia elétrica, tem um enorme impacto sobre a competitividade económica das empresas e famílias, de uma sociedade desenvolvida.

Esta dissertação foca-se, essencialmente, sobre as linhas aéreas de AT e MAT. Onde, a coordenação de isolamento tem especial significado. Pois, devido a restrições ligadas com a economia, o transporte é realizado a elevados níveis de tensão, de forma a minimizar as perdas energéticas. Sendo necessário garantir a segurança de pessoas, animais e bens, assim como assegurar o correto funcionamento das linhas. Surge então o conceito de coordenação de isolamento que, além dos cuidados apontados, considera ainda os fatores que influenciam o desempenho do isolamento. Esses fatores, podem ter origem no sistema, como por exemplo nas sobretensões de manobra, ou podem ser externos ao sistema, através da poluição do local, ou descargas atmosféricas. Conjugando todas estas influências, a coordenação de isolamento resulta em distâncias mínimas, a assegurar, de forma a cumprir-se um determinado desempenho, para as linhas. São aplicados vários equipamentos, tais como isoladores, hastes de guarda, descarregadores de sobretensões e cabos de guarda.

Como as linhas de transporte são pontos fulcrais, para um sistema elétrico, o desempenho que se espera é bastante elevado. Caso contrário, coloca-se em questão a qualidade de serviço. Como as exigências são bastante elevadas é necessário definir o que se considera aceitável, de forma a encontrar um equilíbrio entre as necessidades e o esforço económico, que para a coordenação de isolamento é bastante elevado.

Tendo em conta todos os aspetos referidos, esta dissertação tem como objetivo analisar os métodos de coordenação de isolamento a nível nacional e comparar, os mesmos, com os procedimentos internacionais, de forma a avaliar se existe a possibilidade de diminuição das distâncias referidas e assim contribuir para uma compactação das linhas elétricas, de AT e MAT. Para isso, o guia de coordenação de isolamento da REN irá ser considerado como a visão nacional e a norma 60071 da CEI, como a visão internacional.

1.2. Estrutura da Dissertação

O trabalho está dividido em vários capítulos. No capítulo 2, é realizada uma revisão generalizada da coordenação de isolamento. Define-se a coordenação de isolamento, a sua filosofia, os tipos de equipamentos aplicados e descreve-se a forma como é realizada.

No capítulo 3, comparam-se as normas de duas entidades importantes, sendo estas a CEI e IEEE. Este capítulo, pretende verificar se existem diferenças significativas entre as normas de coordenação de isolamento, destas duas entidades.

No capítulo 4, é realizada uma comparação detalhada entre a norma 60071-2, da CEI, e o guia de coordenação de isolamento, da REN. A escolha da comparação do guia com esta

norma, deve-se ao facto de o guia ter forte influência de normas da CEI. No entanto, como a CEI 60071 foi realizada posteriormente, é normal que tenha introduzido alterações significativas, neste tema. Espera-se assim, através de uma análise criteriosa, encontrar alterações que possam ter um impacto positivo na realização da coordenação de isolamento, a nível nacional.

No capítulo 5, é realizada uma aplicação das diferenças encontradas, no capítulo anterior, de forma a verificar o impacto, das mesmas. Sendo assim possível, tirar conclusões concretas do trabalho, relativamente à compactação de linhas aéreas.

No último capítulo, são referidas as principais conclusões retiradas da realização desta dissertação. Sendo também referido possíveis trabalhos futuros, a realizar, dentro deste tema.

Por fim, em anexo, é possível consultar informação com relevância para o entendimento de alguns aspetos, avançados ao longo do trabalho. Para maior facilidade de consulta, durante o relatório, são referidos quais os anexos a consultar.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1. Introdução ao Tema

Do ponto de vista técnico, a coordenação de isolamento tem como objetivos evitar os danos no equipamento elétrico das instalações, causados por sobretensões, às quais estão sujeitas. Assim como localizar as descargas, quando é economicamente inviável impedi-las, em pontos onde não possam causar danos e de forma a não colocar em causa a qualidade e continuidade de serviço.

A coordenação de isolamento reúne as características dielétricas dos equipamentos, em função das tensões que podem surgir na rede, em que estão inseridos, assim como as características dos dispositivos de proteção disponíveis. Procura-se, assim, encontrar um equilíbrio entre a probabilidade de as solicitações dielétricas danificarem o isolamento dos componentes, ou afetarem a continuidade de serviço e o esforço económico resultante da execução de tal isolamento.

Consideram-se as sobretensões previsíveis, quer de origem interna, quer de origem externa. De origem interna, consideram-se normalmente as solicitações em regime permanente, sobretensões temporárias e de manobra. De origem externa, são de especial relevo as sobretensões de origem atmosférica.

Estabelecem-se níveis de isolamento, que se caracterizam como as máximas tensões às quais o isolamento pode resistir sem que ocorram cedências. O estabelecimento de diferentes níveis de isolamento, para os diversos componentes de uma rede, consiste na definição da ordem pela qual eles cederão às sobretensões, pelas quais podem ser atingidos.

Existem certas solicitações para as quais nenhum isolamento economicamente realizável pode resistir, como acontece com as sobretensões de origem atmosférica. Como tal, aceitam-se a existência de contornamentos. No entanto, coloca-se em questão se esses contornamentos se verificam em pontos onde não possam causar danos (isolamento auto regenerável), protegendo-se os outros pontos da rede com a instalação de dispositivos de proteção, tais como hastes de descarga e descarregadores de sobretensões. A coordenação

de isolamento relaciona, assim, as características do isolamento e as dos equipamentos de proteção, contra sobretensões.

2.2. Filosofia

Posto o já referido, pode-se definir a coordenação de isolamento como o processo que permite selecionar a rigidez dielétrica dos equipamentos, existentes numa rede, em função das solicitações que os podem atingir, durante o seu tempo de vida útil.

De uma forma genérica, pode-se dividir o processo nos seguintes passos:

- Definição de um desempenho aceitável;
- Caracterização das sobretensões e das solicitações ambientais;
- Seleção dos níveis de isolamento;
- Avaliação do desempenho;
- Aplicação das medidas de proteção, contra sobretensões;
- Verificação das características do isolamento.

Como já referido, existe a necessidade de conhecer as perturbações a que os equipamentos estão sujeitos. Essas perturbações são variadas, podendo ser conjugadas com fatores ambientais adversos, que podem representar uma dificuldade acrescida para o isolamento. Normalmente, consideram-se as seguintes solicitações:

- **Tensões em regime permanente à frequência industrial.** O isolamento assegura o funcionamento da rede com estas tensões, quando em condições ambientais normais. No entanto, condições como poluição salina podem influenciar negativamente o desempenho do isolamento;
- **Sobretensões temporárias.** Causadas por defeitos ou manobras de abertura/fecho de disjuntores. A duração destas sobretensões encontra-se compreendida entre os 20ms e 1 hora;
- **Sobretensões transitórias de frente lenta.** Têm como origem, transitórios resultantes de manobras de ligação ou indução de uma descarga atmosférica, numa linha vizinha. Podem apresentar um tempo de subida compreendido entre os 20 e 5000 μ s;
- **Sobretensões transitórias de frente rápida.** Têm origem em descargas atmosféricas. O tempo de subida compreende-se entre os 0,1 e 20 μ s.

2.3. Métodos Convencionais e Estatísticos

Tradicionalmente, a coordenação de isolamento baseia-se em métodos determinísticos. Quer isto dizer, que existe a pretensão de não ocorrer cedência dielétrica do isolamento. Já os métodos estatísticos, ponderam um determinado risco de cedência. Consideram a

probabilidade de ocorrência de sobretensões e a probabilidade de cedência do isolamento, quando submetido às solicitações dielétricas.

Os métodos determinísticos baseiam-se em métodos convencionais, de sobretensão máxima e de tensão de ensaio ao choque de manobra, ou choque atmosférico. O isolamento é dimensionado de forma a garantir uma margem, definida como suficiente, entre a sobretensão máxima e a tensão suportável, por esse isolamento. Não é definido qualquer risco de cedência do isolamento, pelo que tem como resultado um aumento do custo do equipamento.

Como o peso económico do isolamento é bastante considerável, torna-se essencial recorrer a métodos estatísticos. Esses métodos, através da redução da resistência do isolamento, permitem uma poupança significativa. Como admitem a cedência do isolamento, é necessário avaliar quantitativamente esse risco, de forma a ser utilizado como índice de segurança.

Quando se conhecem as distribuições estatísticas das sobretensões e das tensões suportáveis por determinado isolamento, pode-se obter o risco de cedência.

2.3.1. Formulação do Risco de Cedência de um Isolamento

Qualquer variável aleatória, como o valor de crista de uma sobretensão ou a tensão para qual se verifica a descarga num isolamento, pode ser expressa pela curva que indica a sua densidade de probabilidade p , ou pela curva que indica a sua probabilidade acumulada P . Sendo a última a curva integral da primeira.

Suponha-se uma sobretensão de valor U e defina-se a distribuição dos valores das sobretensões, como a densidade de probabilidade $p_o(U)$. A probabilidade de que surja uma sobretensão entre U' e $U' + \partial U$ é $p_o(U') \partial U$, tal como se indica na figura seguinte.

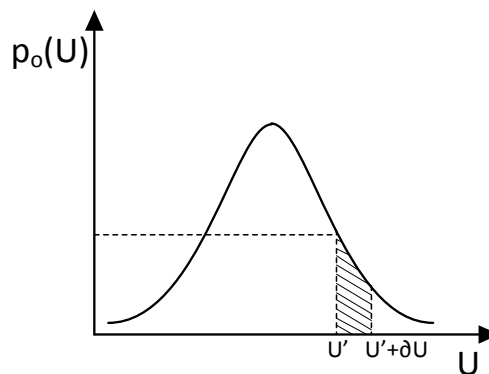


Figura 2.1 – Probabilidade de ocorrência de uma sobretensão, entre U' e $U' + \partial U$.

Por outro lado, admitindo-se que o comportamento dielétrico de um determinado isolamento é definido pela probabilidade acumulada $P_T(U)$, quando sujeito a uma sobretensão de valor U .

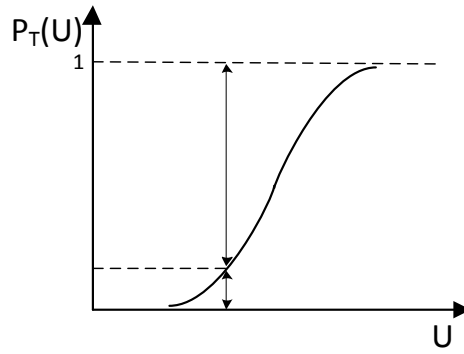


Figura 2.2 – Probabilidade acumulada do comportamento de um dado isolamento, quando sujeito a uma sobretensão de valor U' .

A densidade de probabilidade de cedência do isolamento, pela ocorrência de uma sobretensão de valor U' , é dada pelo produto da densidade de probabilidade do aparecimento da sobretensão, pela probabilidade de cedência do isolamento quando solicitado por essa mesma sobretensão. Logo, tem-se que

$$\partial R = p_o(U') \cdot P_T(U) \partial U \quad (2.1)$$

A probabilidade de se verificar a cedência do isolamento, para um valor genérico U , é dada pela equação (2.2).

$$R = \int_0^{\infty} p_o(U) \cdot P_T(U) \partial U \quad (2.2)$$

Graficamente, a cedência do isolamento para uma sobretensão de valor U é interpretada tal como apresentado na seguinte figura.

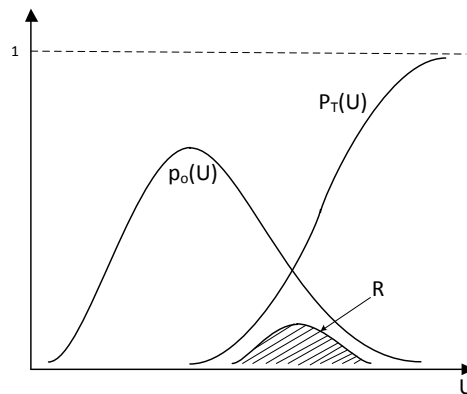


Figura 2.3 – Probabilidade de cedência do isolamento a uma sobretensão de valor U .

O risco de cedência possui um sentido físico preciso, ao contrário do fator de segurança. Os métodos estatísticos permitem coordenar os níveis de segurança de diversas partes da rede, conforme as consequências de uma cedência. Permite também, realizar análises de

sensibilidade, avaliando por exemplo a influência de uma mudança na severidade das sobreensões ou do comportamento do isolamento, sobre a probabilidade de cedência. O método estatístico permite, assim, tomar decisões com base em dados concretos.

O método estatístico, exige que as sobreensões e o comportamento dielétrico, do isolamento, sejam descritos pelas suas distribuições estatísticas. O isolamento é dimensionado de forma a que a probabilidade, de cedência, seja inferior ou igual a um valor fixado, inicialmente, caracterizando o nível de segurança necessário.

Pela análise da **Figura 2.3**, verifica-se que uma alteração do nível de isolamento implica uma translação da curva representativa da probabilidade de descarga do isolamento, $P_T(U)$, ao longo do eixo das tensões. Tendo como consequência uma modificação da área tracejada, R , que representa o risco de cedência, quando a tensão têm um valor aleatório.

Com a recorrência ao método estatístico pode ser necessário realizar várias tentativas, sucessivas, de cálculo e avaliação do risco de cedência até se encontrar uma solução que corresponda ao risco pretendido.

A precisão, com que as sobreensões e probabilidade de cedência do isolamento são fixadas, tem especial relevância para a precisão do cálculo do risco de cedência.

2.4. Equipamento de Proteção contra Sobreensões

Os equipamentos de proteção, contra sobreensões, podem ser divididos em dois grupos. Equipamentos de proteção ativa e equipamentos de proteção passiva.

Os aparelhos de proteção ativa utilizados são:

- Hastes de guarda;
- Descarregadores de sobreensões.

Para proteção passiva:

- Cabos de Guarda;
- Isoladores.

2.4.1. Hastes de Guarda

Também conhecidas como explosores, são constituídas por dois elétrodos separados pelo ar, encontrando-se um deles ligado ao condutor e o outro ligado à terra. Face a uma sobreensão, superior ao nível de proteção estabelecido, cria-se um arco elétrico entre os dois elétrodos, criando-se assim um caminho condutor para a terra. Dessa forma, são limitados os efeitos da sobreensão.

Relativamente à sua forma construtiva, podem assumir as seguintes variantes:

- **Duas simples varas, ou hastes de descarga.** As hastes são colocadas uma em frente à outra. Apenas oferecem uma proteção de reserva, em caso de falha de dispositivos com maior relevância para a coordenação de isolamento. Podem ser do tipo regulável, ou do tipo fixo;
- **Explosores de antenas.** Constituídos por duas antenas, de forma a provocar o alongamento do arco elétrico;
- **Dispositivos mais elaborados.** Para além dos elétrodos de escorvamento, possuem anéis destinados a eliminar os eflúvios de efeito de coroa¹.

Estes equipamentos têm sido muito utilizados devido a vantagens que apresentam, tais como o seu baixo preço e facilidade de ajuste, sendo facilmente adaptados de acordo com as necessidades do local onde são instalados. No entanto, também possuem aspetos negativos, tais como:

- Dificuldade de extinção por si só, após um escorvamento, resultando numa interrupção de serviço após cada atuação;
- A sua atuação cria uma onda cortada de elevado gradiente de frente, que pode originar avarias em componentes bobinados, como transformadores, e originar maiores sobretensões por reflexão, em redes mistas aéreas/subterrâneas;
- Atraso considerável entre o momento em que a tensão atinge o nível de proteção e o momento em que ocorre o escorvamento. Como consequência, a tensão pode ultrapassar o nível de proteção do explosor, sendo especialmente grave para isolamentos sólidos;
- O nível de tensão a que ocorre o escorvamento, depende largamente das condições atmosféricas, podendo atingir em condições extremas variações superiores a 40%;
- O gelo que se deposita sobre os elétrodos diminui a distância de escorvamento, provocando atuações intempestivas. Como as sobretensões de origem atmosférica não surgem em períodos de gelo, a dificuldade é ultrapassada com o ajuste sazonal dos elétrodos, não sendo prático nem garantidamente exato.

Na imagem seguinte, apresenta-se uma cadeia de isoladores com haste de guarda, do tipo regulável.

¹ A corrente de fugas nas linhas aéreas é geralmente muito pequena e vai subindo, proporcionalmente com a tensão, até um determinado limite. A partir desse ponto o crescimento torna-se muito rápido, deixando de ser desprezável. Assim, para valores muito elevados de tensão a corrente de fuga, pelo ar, passa a ter um valor significativo e o ar, que quando seco é um isolante perfeito deixa de o ser. O campo elétrico passa a ter valores elevados e começam a aparecer eflúvios luminosos, produzindo um leve crepitar, nos pontos onde há arestas ou saliências, em resultado do poder das pontas, esses eflúvios constituem o começo da perfuração do dielétrico. A partir de determinado valor de tensão, e quando observado na escuridão, todo o condutor aparece envolto por uma auréola luminosa azulada, que produz um ruído semelhante a um apito. Designa-se este fenómeno por efeito de coroa [3].

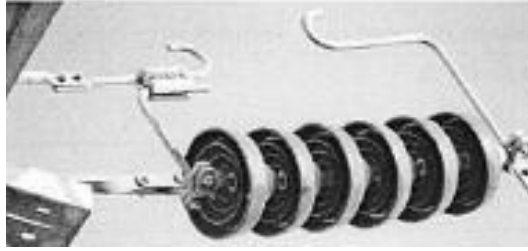


Figura 2.4 – Cadeia de Isoladores com haste de guarda regulável [2].

2.4.2. Descarregador de Sobretensões

Os descarregadores de sobretensões foram desenvolvidos com o objetivo de evitar os inconvenientes dos explosores. Tal como eles, os descarregadores escoam as correntes para a terra, quando são atingidos por uma sobretensão. Para além disso, limitam a amplitude e a duração da corrente, que a rede continua a debitar, através deles após a passagem da onda da sobretensão sem que os disjuntores tenham de atuar.

Construtivamente, os descarregadores, são constituídos por um ou vários explosores ligados em série, com uma ou várias resistências de característica não linear, estando o conjunto no interior de um invólucro isolante e estanque. De forma a garantir uma repartição correta da tensão aplicada, entre os diversos elementos, recorre-se a divisores de tensão resistentes ou capacitivos.

Os descarregadores mais utilizados são os de carboneto de silício (SiC) e os de óxido de zinco (ZnO).

Os **descarregadores de sobretensão de carboneto de silício (SiC)** caracterizam-se por:

- Possuir uma ligação em série de resistência SiC e de explosores. Durante a sobretensão ocorre uma disrupção nos explosores, que por sua vez liga os blocos de SiC à rede;
- Devido à sua característica não linear, os blocos de SiC estabelecem um circuito à terra de baixa impedância para a sobretensão e limita a corrente de seguimento provocada pela tensão da rede. Assim, o arco elétrico que se estabelece entre os explosores é extinto na primeira passagem por zero, da tensão;

Na figura **Figura 2.5**, é possível visualizar a constituição deste tipo de descarregadores, assim como a sua característica tensão-corrente.

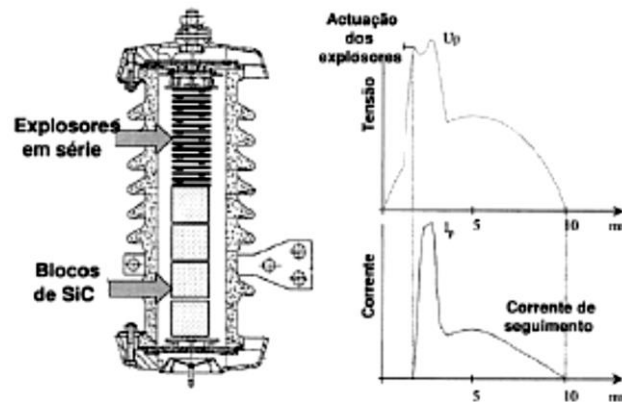


Figura 2.5 – Constituição e característica tensão-corrente dos descarregadores de sobretensões de carboneto de silício [2].

Os **descarregadores de sobretensões de óxido de zinco (ZnO)** são constituídos por uma coluna de pastilhas, de óxido de zinco. O seu comportamento pode ser descrito em três regiões de condução das pastilhas:

- *Região 1:* O descarregador apresenta uma característica de alta impedância para a tensão à frequência industrial. A corrente é maioritariamente capacitiva com uma pequena componente resistiva;
- *Região 2:* Início da condução, quando a tensão estipulada excede a tensão estipulada do descarregador;
- *Região 3:* O descarregador apresenta uma característica tensão-corrente não linear.

Na figura seguinte, pode-se visualizar esse mesmo comportamento. Verifica-se que até à tensão nominal (1 p.u.) o descarregador comporta-se como uma impedância elevada, quase exclusivamente capacitiva. De 1 p.u. até 2 p.u. comporta-se como uma resistência em que o seu valor é tanto menor quanto maior a tensão, a que está sujeito. A partir de 2 p.u. o comportamento deixa de ser linear.

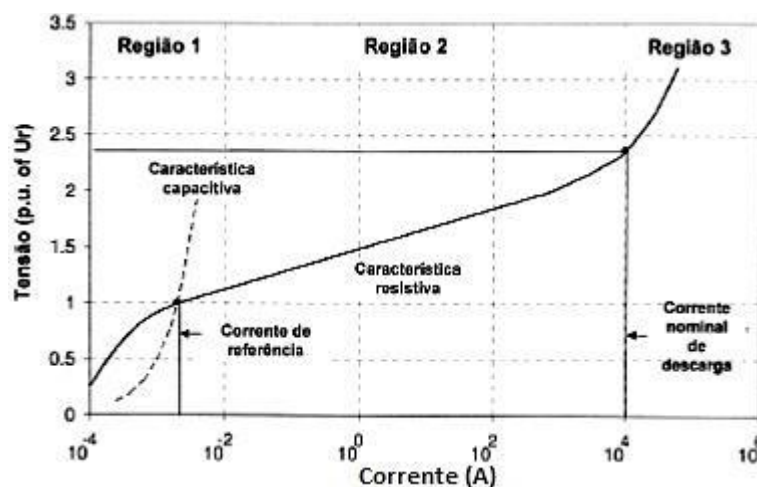


Figura 2.6 – Comportamento do descarregador de sobretensões de óxido de zinco [2].

Relativamente ao aspeto construtivo e à característica tensão-corrente, apresenta-se a **Figura 2.7**, que descreve exatamente esses aspetos. Verifica-se que este tipo de descarregador é mais rápido na extinção do defeito, não se notando corrente de seguimento. Este descarregador tem vindo a ser o mais utilizado, colocando os descarregadores de carboneto de silício em desuso.

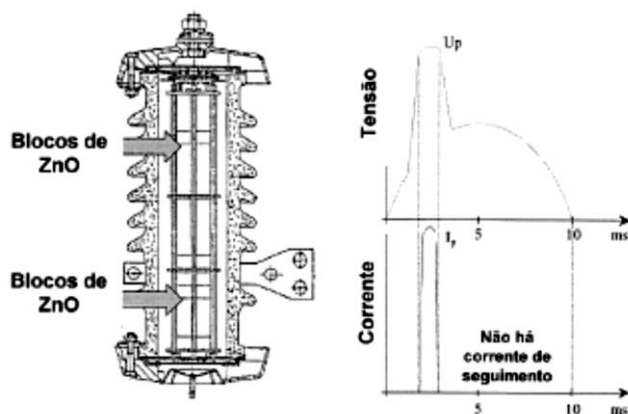


Figura 2.7 – Constituição e característica tensão-corrente dos descarregadores de sobretensões de óxido de zinco [2].

2.4.3. Cabos de Guarda

O objetivo da utilização dos cabos de guarda é intercetar as descargas atmosféricas, que de outra forma iriam atingir diretamente os condutores de fase. Como os cabos de guarda se encontram ligados aos apoios e estes nem sempre possuem uma resistência de terra suficientemente baixa, existe o risco de contornamento inverso, e consequentemente abertura da linha. Apesar disso, a utilização de cabos de guarda tem-se demonstrado uma mais valia, tendo um grande impacto na amplitude das sobretensões induzidas por origem atmosférica.

2.4.4. Isoladores

Os isoladores desempenham a função de evitar a passagem de corrente do condutor ao apoio, ou suporte, e sustentar mecanicamente os cabos. Nas linhas aéreas, os isoladores nas cadeias isolam eletricamente as linhas dos apoios e sustentam mecanicamente os cabos aéreos, de transporte de energia.

Relativamente ao tipo, os isoladores podem ser rígidos ou suspensos. Para tensões de serviço superiores a 60 kV, e até mesmo para tensões inferiores, os isoladores rígidos são de difícil montagem e frágeis, devido às suas dimensões. De forma a ultrapassar essas dificuldades, desenvolveram-se isoladores suspensos, compostos por vários elementos em forma de cadeia [3]. Essas cadeias podem ser simples ou duplas, dentro de dois tipos:

- *Cadeias de suspensão*: Cadeias verticais ou em V, usadas em apoios onde apenas há suspensão de linhas (apoios de alinhamento) ou de pequeno ângulo;

- *Cadeias de amarração*: Cadeias horizontais, usadas em apoios de amarração, de ângulo ou fim de linha.

Os isoladores são especificados de acordo com o material utilizado para o corpo isolante. Estes podem ser de vidro, porcelana ou polímero. Os isoladores polímeros dividem-se em compósito e resina.

Nas linhas de transmissão, os mais utilizados são os de vidro e porcelana. Essa utilização deve-se às suas características, tais como a sua fiabilidade e bom desempenho. Os isoladores de vidro têm a particularidade de permitirem visualizar os defeitos internos, no entanto são alvos para vandalismo. Os de porcelana, têm a vantagem de não estilhaçar quando vandalizados, no entanto não permitem uma fácil visualização de defeitos internos, ao contrário dos de vidro. Ambos apresentam, ainda, a desvantagem do elevado peso.

2.5. Realização da Coordenação de Isolamento

A coordenação de isolamento realiza-se com base nos princípios atrás enunciados e na utilização dos equipamentos de proteção, já referidos. De uma forma geral, é baseada em três níveis de isolamento. O mais baixo, corresponde aos aparelhos de proteção (hastes de guarda e descarregadores de sobretensões). O nível de isolamento intermédio, corresponde aos isoladores e distâncias livres no ar, entre polos e terra. O nível mais elevado, corresponde aos componentes com isolamentos sólidos ou líquidos, tais como transformadores, cabos e condensadores, assim como as distâncias entre contatos abertos e entre diferentes fases dos aparelhos de corte. Esses três níveis, são designados como nível de proteção, nível de segurança e nível elevado.

Assim, se a coordenação de isolamento funcionar devidamente, todas as descargas deverão verificar-se nos aparelhos de proteção contra sobretensões, não se verificando nenhuma descarga nos equipamentos do nível de segurança. Caso o primeiro nível não atue, a descarga deverá ocorrer nos equipamentos do nível de segurança [1].

Capítulo 3

Normas de Coordenação de Isolamento

Neste capítulo, pretende-se realizar o estudo de normas com relevância para o tema em questão. Para isso, consideram-se duas normas internacionais. A norma CEI 60071-1 e a IEEE C62.82.1, que substitui a IEEE 1313.1.

Irão ser apresentados, de uma forma resumida, os principais aspetos que caracterizam as normas e irá ser realizada uma comparação, entre as mesmas.

3.1. CEI 60071

O documento 60071-1 [5], da Comissão Eletrotécnica Internacional, define os princípios gerais, definições e regras que a comissão considera relevante, para a realização da coordenação de isolamento. Para além desse documento, foram também consideradas as alterações que a “*Amendment 1*” [6] introduziu, no mesmo.

A realização da coordenação de isolamento é apresentada, por esta norma, através de um diagrama que descreve os procedimentos gerais, a seguir. Nesse diagrama, verifica-se que a comissão divide o processo em quatro grandes passos:

- **1º Passo:** Determinação das *tensões e sobretensões representativas* (U_{rp})²;
- **2º Passo:** Determinação das *tensões suportáveis de coordenação* (U_{cw})³;
- **3º Passo:** Determinação das *tensões suportáveis requeridas* (U_{rw})⁴;
- **4º Passo:** Determinação das *tensões suportáveis padronizadas* (U_w)⁵.

Na **Figura 3.1**, apresentada de seguida, é exposto o diagrama que consta na norma 60071-1, elaborada pela CEI.

² *Representative voltages and overvoltages, U_{rp}*

³ *Co-ordination withstand voltages, U_{cw}*

⁴ *Required withstand voltages, U_{rw}*

⁵ *Standard withstand voltages, U_w*

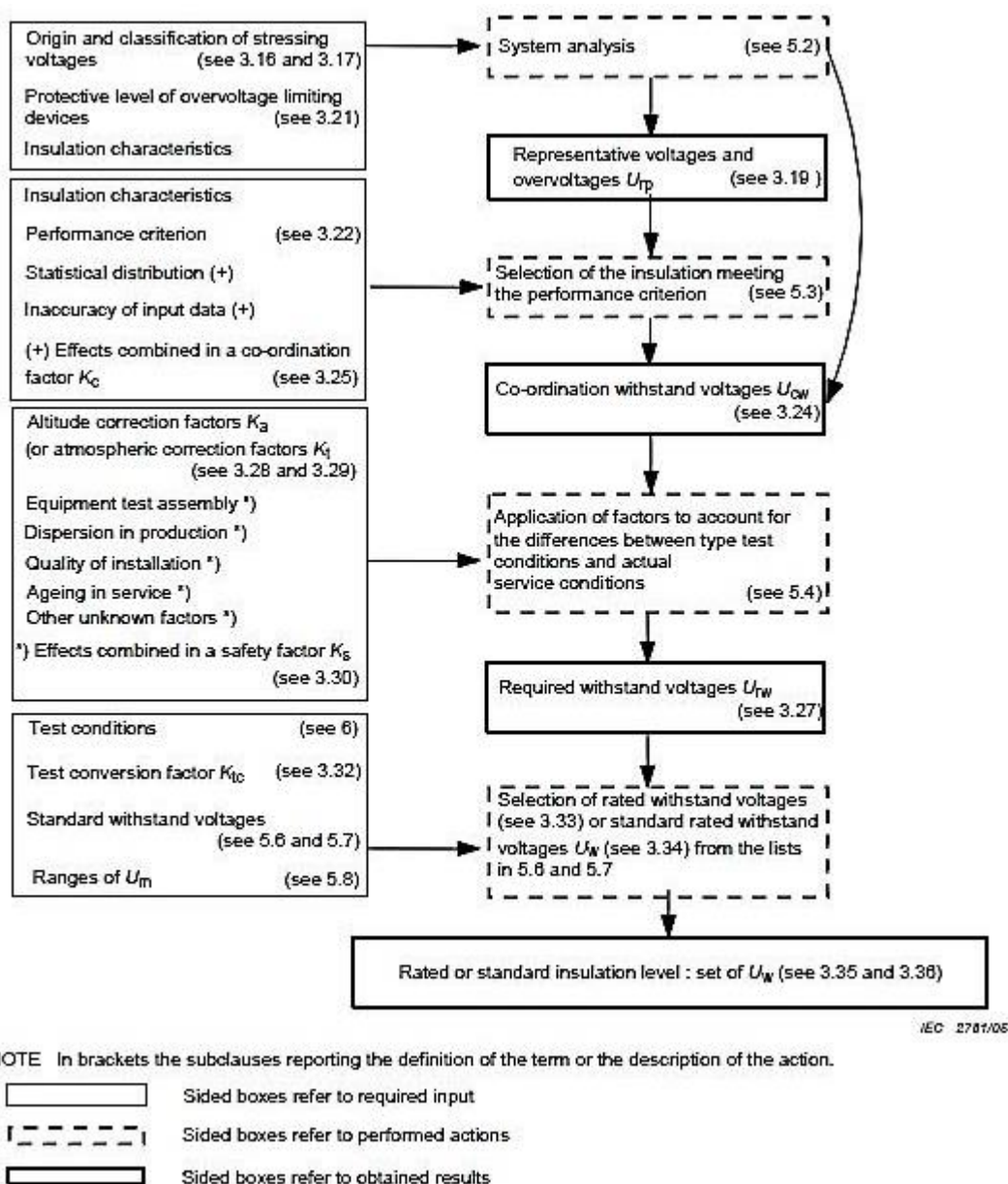


Figura 3.1 – Diagrama do procedimento para coordenação de isolamento, apresentado pela CEI [5].

3.1.1. Determinação das Tensões e Sobretensões Representativas (U_{rp})

As tensões e sobretensões, que ameaçam o isolamento, devem ser determinadas em amplitude, forma e duração. Essa determinação, deverá ter como base uma análise do sistema que inclua a seleção e localização dos dispositivos, de prevenção e limitação de sobretensões.

Para cada classe, de tensão e sobretensão, a análise deverá determinar uma tensão e sobretensão representativa. Deverá ter em consideração as características do isolamento, relativamente aos diferentes comportamentos a formas de tensão, ou sobretensão no sistema e a formas da tensão padronizadas, aplicadas em testes padronizados de tensão suportável.

Na **Figura A. 1**, é possível consultar as formas de onda padrão das tensões e sobretensões, que deverão ser consideradas.

As tensões e sobretensões representativas poderão ser caracterizadas por:

- Um máximo assumido, ou
- Um conjunto de valores de pico, ou
- Uma distribuição estatística completa de valores de pico.

Quando a adoção de um máximo assumido é considerado adequado, a sobretensão representativa das várias classes deverá ser:

- **Tensão contínua à frequência industrial:** Tensão à frequência industrial com valor r.m.s. igual à maior tensão do sistema, e com duração correspondente à vida útil do equipamento;
- **Sobretensão Temporária:** Tensão padronizada de curta duração à frequência industrial, com um valor r.m.s. igual ao máximo assumido para a sobretensão temporária, dividido por $\sqrt{2}$;
- **Sobretensão de frente lenta:** Impulso de manobra padrão, com um valor de pico igual ao do máximo assumido para a sobretensão de frente lenta;
- **Sobretensão de frente rápida:** Impulso padrão de descarga atmosférica, com um valor de pico igual ao máximo assumido da sobretensão de frente rápida fase-terra;
- **Sobretensão de frente muito rápida:** Característica definida pelas entidades responsáveis;
- **Sobretensão fase-fase de frente lenta:** Impulso de manobra padrão, combinado com um valor de pico igual ao do máximo da sobretensão fase-fase, de frente lenta;
- **Sobretensão longitudinal de frente lenta [ou frente rápida]:** Tensão combinada, que consiste num impulso de manobra [ou descarga atmosférica] padrão e com tensão à frequência industrial. Cada uma com valor de pico igual ao dos dois máximos relevantes e com o instante de impulso, de pico, coincidente com o pico da frequência industrial de polaridade oposta.

3.1.2. Determinação das Tensões Suportáveis de Coordenação (U_{cw})

A determinação das tensões suportáveis de coordenação, consiste na determinação dos valores mais baixos das tensões suportáveis, do isolamento, cumprindo os critérios de desempenho quando sujeito as sobretensões representativas, sob condições de serviço.

As tensões suportáveis de coordenação, têm a forma das sobretensões representativas e os seus valores são obtidos através da multiplicação dos valores, das sobretensões representativas, por um fator de coordenação (k_c). O valor desse fator, depende da precisão da avaliação das sobretensões e da estimativa empírica, ou estatística, da distribuição das sobretensões e das características do isolamento.

Simulação de sobretensões, combinada simultaneamente com a avaliação do risco de falha, usando as características relevantes do isolamento, permitem determinar diretamente as

tensões estatísticas suportáveis, sem o passo intermédio de determinar as sobretensões representativas.

3.1.3. Determinação da Tensão Suportável Requerida (U_{rw})

A determinação da tensão suportável requerida, de isolamento, consiste na conversão das tensões suportáveis de coordenação para as condições de teste padrão. Tal é conseguido através da multiplicação, das tensões suportáveis de coordenação, por fatores que compensam as diferenças entre as condições reais de serviço, do isolamento, e as dos testes de tensão suportável padrão.

Os fatores, a ser aplicados, deverão compensar as condições atmosféricas através de um fator de correção, k_t , e os efeitos abaixo listados através de um outro fator, k_s .

- As diferenças na montagem do equipamento;
- A dispersão da qualidade do equipamento;
- A qualidade do isolamento;
- O envelhecimento do isolamento ao longo da sua vida útil;
- Outras influências desconhecidas.

A comissão eletrotécnica recomenda, que quando não especificado pelas entidades competentes, os seguintes valores para o fator de segurança:

- $k_s = 1,15$ para isolamento interno;
- $k_s = 1,05$ para isolamento externo.

A correção atmosférica é aplicada apenas para o isolamento externo. k_t deverá ser aplicado tendo em consideração as diferenças entre as condições atmosféricas padrão e as esperadas em serviço.

Para a correção de altitude, o fator k_a , que considera apenas a pressão média do ar correspondente à altitude, deverá ser aplicado. Esse fator deverá ser aplicado para qualquer altitude.

$$k_a = e^{m \left(\frac{H}{8150} \right)}, \quad (3.1)$$

onde

H – Altitude, acima do nível do mar (metros).

$m = 1$ para tensões suportáveis, a impulso atmosférico.

m de acordo com a **Figura A. 2** para tensões suportáveis, de impulso de manobra.

$m = 1$ para tensões suportáveis de curta duração, à frequência industrial, para isoladores limpos e distâncias no ar.

Para isoladores poluídos, o valor do expoente é experimental. Para propósitos do teste de longa duração e, se necessária, da tensão suportável de curta duração à frequência industrial, m pode variar entre 0,5 e 0,8 para isoladores normais e para isoladores com desenho especial para nevoeiro, respetivamente.

3.1.4. Determinação das Tensões Suportáveis Padrão (U_w)

A seleção do nível nominal do isolamento, consiste na seleção mais económica do conjunto de valores normalizados, das tensões suportáveis nominais (U_w) do isolamento, suficiente para garantir que todas as tensões suportáveis requeridas são cumpridas.

A tensão mais elevada para o equipamento é então escolhida como o valor padrão seguinte, de U_m igual ou maior que o valor mais elevado de tensão do sistema, onde o equipamento irá ser instalado.

Para equipamento a instalar em condições atmosféricas normais, relevantes para o isolamento, U_m deverá ser pelo menos igual a U_s . Para equipamento a ser instalado fora das condições atmosféricas normais, U_m poderá ser maior que o valor seguinte normalizado igual ou maior que U_s , de acordo com as necessidades especiais existentes.

As tensões suportáveis, que garantem que as tensões suportáveis temporárias, de frente lenta e de frente rápida são cumpridas, para isolamento fase-terra, fase-fase e longitudinal, podem ser selecionadas com a mesma forma que as tensões suportáveis requeridas, ou com uma forma diferente, explorando as características intrínsecas do isolamento.

O valor da tensão suportável nominal é selecionado da lista, apresentada em anexo, de valores padrão de tensão suportável nominal, A1.3 e A1.4, como o valor seguinte maior ou igual que:

- A tensão suportável requerida, no caso da mesma forma;
- A tensão suportável requerida multiplicada pelo fator de conversão, no caso de forma diferente.

Para equipamento a ser usado em condições ambientais normais, o nível de isolamento deverá ser escolhido, preferencialmente, de entre os valores apresentados em anexo, A1.5 e A1.6.

3.2. IEEE C62.82.1

Esta norma [9], define que os procedimentos para a realização da coordenação de isolamento consiste em:

- a) Determinar os esforços dielétricos do sistema⁶

⁶ System Voltage Stresses

- b) Selecionar a robustez do isolamento para alcançar a probabilidade de falha desejada, quando o equipamento é exposto aos esforços determinados em a).

3.2.1. Determinação dos Esforços Dielétricos

A amplitude, forma de onda e duração das sobretensões, que põem em causa o isolamento, são tipicamente determinadas por meio de análise transitória do sistema. Essa análise, inclui as características do equipamento limitador de sobretensões, em determinados locais.

A sobretensão pode caracterizar-se por:

- Valores máximos de crista;
- Distribuição estatística dos valores de crista;
- Valor estatístico da sobretensão.

A análise transitória deverá fornecer os esforços dielétricos para as seguintes classes de sobretensão:

- Sobretensão temporária⁷ (fase-terra e fase-fase);
- Sobretensão de manobra⁸ (fase-terra e fase-fase);
- Sobretensão atmosférica⁹ (fase-terra e fase-fase);
- Sobretensão longitudinal¹⁰.

Na norma são apresentadas algumas formas de onda comuns, que são as presentes no anexo A2.1.

3.2.2. Comparação entre Sobretensões e Suportabilidade Dielétrica

As sobretensões são comparadas com a suportabilidade dielétrica do isolamento¹¹, de forma a obter-se uma margem de proteção. Antes da comparação, poderá ser necessário ajustar a suportabilidade dielétrica padrão de isolamento, fornecida para o equipamento, de forma a suportar formas de onda não padronizada e/ou condições atmosféricas não padronizadas.

A suportabilidade dielétrica do isolamento, para sobretensões com formas de onda não padronizadas, é avaliada através da comparação com a suportabilidade dielétrica fornecida por testes de onda padrão.

⁷ *Temporary overvoltage*

⁸ *Switching overvoltage*

⁹ *Lightning overvoltage*

¹⁰ *Longitudinal overvoltage*

¹¹ *Insulation strength*

São consideradas as condições de humidade, sendo necessário considerar a densidade do ar correspondente à altitude. Em [11] é definido o fator de correção de densidade do ar, k_1 . Depende da densidade relativa do ar δ e pode-se exprimir na expressão seguinte.

$$k_1 = \delta^m, \quad (3.2)$$

onde, segundo a norma 1313-2 [10],

$$\delta = e^{-\frac{A}{8,6}}, \quad (3.3)$$

A , representa a elevação em km. O expoente, m , continua sob consideração, sendo obtido através de valores experimentais. Em anexo, A2.2, apresenta-se uma figura com valores aproximados de m , em função de um parâmetro g , sendo definido como,

$$g = \frac{V_B}{500.L.\delta.k}, \quad (3.4)$$

sendo que,

V_B , é o valor, medido ou estimado, de 50% da tensão disruptiva em condições atmosféricas reais (em kV). Em caso de teste de suportabilidade, considera-se como 1.1 vezes da tensão de teste.

L , é o caminho mínimo de descarga, em metros.

k , é um parâmetro que depende do tipo de teste de tensão, que para propósitos práticos pode ser obtido como função do rácio entre a humidade absoluta, h , e a densidade relativa do ar, δ . Em anexo, A2.2, apresenta-se a variação de k em função de h/δ .

Adicionalmente, poderá ser necessário uma margem de segurança baseada em fatores como:

- Natureza estatística dos resultados dos testes;
- Montagem do equipamento;
- Envelhecimento do isolamento;
- Precisão das análises;
- Outros fatores.

3.2.3. Seleção do Nível de Isolamento Padrão

Os níveis de isolamento nominal, do equipamento, são selecionados em listas de tensões suportáveis de isolamento normalizadas. Os níveis escolhidos deverão ser aqueles que garantam as margens desejadas, acima dos esforços dielétricos do sistema, resultantes de sobretensões.

A componente da tensão suportável de baixa frequência, de curta duração, deverá ser selecionada da lista de tensões suportáveis normalizadas em anexo, A2.3.

O nível de isolamento básico face a impulsos atmosféricos (BIL) e o nível de isolamento básico face a impulsos de manobra (BSL) são selecionados dos valores em anexo, A2.4.

3.2.4. Seleção do Nível Padrão de Isolamento do Equipamento

A norma, divide as tensões máximas do sistema em duas classes:

- **Classe I:** $\geq 15\text{kV}$ e $\leq 242\text{kV}$;
- **Classe II:** $> 242\text{ kV}$.

O nível padrão de isolamento do equipamento¹² é, normalmente, dado por um conjunto de duas tensões suportáveis padrão.

Para equipamento da classe I, o nível de isolamento padrão suportável¹³ é dado por:

- Tensão suportável de baixa frequência e curta duração;
- BIL.

Para equipamento da classe II;

- BSL;
- BIL.

Os valores deverão ser consultados nas tabelas fornecidas pela norma. Esses valores encontram-se em anexo, A2.5.

3.3. Comparação das Normas

Depois de apresentada a forma, com que cada uma das normas trata o assunto de coordenação de isolamento, podem ser realizadas algumas comparações. Com base na informação, já apresentada, pode-se comparar os documentos relativamente aos passos necessários para a realização da coordenação de isolamento. Para tal, consideram-se três principais passos:

- **Passo 1:** Determinação das ameaças a que o sistema esta sujeito.

Ambas, as normas, procedem ao cálculo das sobretensões que ameaçam o isolamento. Apesar da CEI apresentar um maior detalhe nas classes de sobretensões normalizadas, ambas enumeram as mesmas classes de sobretensões.

- **Passo 2:** Determinação das tensões suportáveis de isolamento.

Neste passo, a CEI procede à obtenção das tensões suportáveis de coordenação e tensões suportáveis requeridas, onde estas últimas são resultado das primeiras convertidas para as condições de teste padrão. Ou seja, afetadas por fatores de compensação. A norma do IEEE, estabelece a comparação entre as ameaças e a suportabilidade do isolamento, tendo em consideração uma margem de segurança.

¹² Standard insulation level of equipment

¹³ Standard insulation withstand level

Ambas apontam as ameaças mais importantes, que necessitam de ser assegurados pelos fatores de segurança, salientando-se a dispersão na produção e instalação de equipamento, envelhecimento, condições atmosféricas e disparidades entre as condições reais e condições padrão das sobretensões.

- **Passo 3:** Seleção de um nível de isolamento padrão.

Ambos os documentos, definem o nível de isolamento padrão com base na tensão máxima do sistema, de entre um conjunto de valores normalizados de tensão suportável nominal.

De uma forma geral, estas normas são muito similares. No entanto, a CEI apresenta-se de uma forma mais esquemática, apresentando uma maior facilidade para automatização do processo.

Capítulo 4

Coordenação de Isolamento Aplicada em Linhas Aéreas

Este capítulo, tem como objetivo analisar o processo de aplicação da coordenação de isolamento, em linhas aéreas, tendo como base os métodos nacionais e internacionais. A visão internacional será dada pela CEI, através da norma 60071-2, enquanto a nacional será apresentada pelo guia de coordenação de isolamento, da REN.

4.1. Solicitações Dielétricas

Relativamente às solicitações dielétricas, a que os equipamentos estão sujeitos, verifica-se desde logo que existem diferenças nos nomes das classes de sobretensão, dadas pelos documentos.

O guia apresenta as seguintes classes:

- Regime Permanente (50Hz);
- Sobretensões Temporárias;
- Sobretensões Atmosféricas;
- Sobretensões de Manobra.

A CEI difere no nome de duas das classes. Classifica como sobretensões de frente rápida e de frente lenta, as sobretensões atmosféricas e de manobra, respetivamente. Para além da diferença nos nomes, a norma apresenta ainda uma outra classe de sobretensões, as de frente muito rápida.

As diferenças apresentadas, devem-se à recente introdução de subestações isoladas a gás. As mesmas, originaram o novo tipo de sobretensões de frente muito rápida. Com esse aparecimento, a CEI atualizou o nome das classes e criou esta discrepância.

4.1.1. Regime Permanente

Esta classe de sobretensão, caracteriza-se por ditar o limite mínimo a garantir durante a vida útil do equipamento. Esta solicitação é muito importante, para a coordenação de isolamento, podendo mesmo representar uma entrave à redução do nível de isolamento. Traduzindo-se num aumento, indesejável, do esforço económico. Esse feito é, especialmente, sentido em redes de muito alta tensão [12].

A escolha de isolamento com base nesta classe deverá contemplar, para a tensão mais elevada da rede, as condições que reduzem o desempenho do isolamento. Essas condições são:

- Chuva, nevoeiro e poluição;
- Envelhecimento do equipamento;
- Redução de distâncias devidas a vento, dilatações térmicas e curto-circuitos.

Uma nota, com relevância, que a REN apresenta é a que para redes até 245 kV, inclusive, o nível de isolamento é dado pela tensão suportável ao choque atmosférico e pela tensão suportável a 50 Hz, durante 1 minuto. Para a rede de 420 kV é definido pelas tensões suportáveis ao choque atmosférico e ao choque de manobra.

4.1.2. Sobretensões Temporárias

Esta classe de sobretensões, é bastante semelhante à solicitação em regime permanente. Pois possuem a mesma frequência da rede, ou são compostas por oscilações próximas da rede. Como tal, as considerações são as mesmas que para o regime permanente.

Estas sobretensões têm origem em:

- Defeito à terra – Provoca uma sobretensão nas fases sãs;
- Rejeição de carga ou eliminação de um defeito – Origina subida de tensão e eventual aumento de frequência;
- Ferro-ressonância¹⁴ – Provocada pelos elementos não lineares tais como transformadores de potência e de medição;

A CEI acrescenta ainda as seguintes origens:

- Sobretensão longitudinal durante sincronização;
- Combinação de origens descritas.

Através de critérios de planeamento e de exploração, é possível atenuar estas sobretensões. Fatores como, os a seguir apresentados, têm influência sobre as mesmas.

¹⁴ Fenómeno não-linear complexo, originado por um circuito capacitivo ressonante, com indutores não lineares presentes em transformadores e que provocam sobretensões. Cujas formas de onda são irregulares e possuem elevado conteúdo harmónico [13].

- Gestão da ligação do neutro, dos transformadores. Tem influência na amplitude das sobretensões temporárias originadas por defeito à terra, sendo menor para ligação do neutro à terra;
- Características do equipamento. Característica magnética dos transformadores de potência e características da regulação dos grupos geradores;
- Características do sistema de proteções. Impacto na duração das sobretensões, deste tipo;
- Utilização de reactâncias de compensação, condensadores série ou condensadores estáticos. Influência sobre as sobretensões com origem na variação de carga;
- Topologia da rede e critérios de exploração. De forma a reduzir as frequências ressonantes.

Normalmente, a seleção da tensão estipulada dos descarregadores de sobretensões é baseada na sobretensão temporária esperada, tendo em consideração a capacidade de dissipação energética do descarregador. Essa associação, é mais crítica para níveis de tensão mais elevada, do que para mais baixa. Deve-se ao facto das margens serem menores para os níveis de tensão superior.

Em termos práticos, os descarregadores não têm influência sobre a generalidade das sobretensões temporárias, excetuando as sobretensões originadas por efeitos de ressonância. Onde, os descarregadores podem ser aplicados para limitar, ou até prevenir, essas sobretensões. Contudo, dever-se-ão tomar precauções relativamente às solicitações térmicas, impostas ao descarregador [7].

A CEI, faz ainda algumas recomendações para a análise destas sobretensões. Sendo, as mesmas, apresentadas de seguida.

- Para sistemas com extensão moderada, a rejeição total de carga pode originar uma sobretensão com amplitude inferior a 1,2 p.u. A duração poderá atingir vários minutos;
- Para sistemas extensos, depois da rejeição total de carga, a sobretensão fase-terra pode atingir 1,5 p.u. ou até mais, quando ocorrem efeitos de ressonância ou de Ferranti¹⁵. Pode prolongar-se por alguns segundos;
- Se apenas existir carga estática, no lado rejeitado, a sobretensão temporária longitudinal é normalmente igual à sobretensão fase-terra. Em sistemas com motores ou geradores, no lado rejeitado, a separação da rede pode originar um aumento da sobretensão temporária longitudinal, composta por duas componentes da sobretensão fase-terra em oposição de fase, com amplitude máxima abaixo de 2,5 p.u. Esse valor pode ser excedido em sistemas extensos, de alta tensão.

¹⁵ Quando uma linha em vazio, de grande dimensão, é alimentada por uma das suas extremidades e a outra se encontra aberta, produz-se um fenómeno de ressonância que se manifesta através do aumento da tensão ao longo da linha, até à extremidade aberta. A esse efeito dá-se o nome de Ferranti.

Os valores p.u., apresentados, são referidos à tensão $\frac{\sqrt{2} \times U_S}{\sqrt{3}}$.

4.1.3. Sobretensões de Frente Lenta (Manobra)

Esta classe de sobretensões tem, essencialmente, origem em operações de manobra de disjuntores. Podem também resultar do aparecimento e eliminação de defeitos. Têm origem em:

- Ligação e religação de linhas em vazio;
- Aparecimento e eliminação de defeito;
- Rejeição de carga;
- Corte de correntes capacitivas ou indutivas;
- Descargas atmosféricas, distantes, sobre condutores.

Normalmente, em redes com tensão mais elevada abaixo dos 300 kV, as sobretensões de manobra não representam uma solicitação determinante, no dimensionamento do isolamento. Nessas redes, as sobretensões com origem atmosférica ultrapassam as necessidades que as sobretensões de manobra impõem. Apesar disso, existem algumas exceções ligadas, essencialmente, com o corte de correntes indutivas. Um exemplo, é o corte de corrente de arranque de motores elétricos. Sendo, por vezes, necessário recorrer à instalação de descarregadores, mesmo tratando-se de redes industriais isentas de sobretensões atmosféricas [12].

Os documentos, recorrem à mesma onda convencional para efeitos de ensaio. Essa onda, é a onda normalizada de 250/2500 μ s. Ou seja, com um tempo de pico de 250 μ s e tempo de descida (50%) de 2500 μ s.

Ambos, apresentam intervalos de valores das sobretensões de 2% (valores de sobretensões com probabilidade de 2% de ser excedida), que podem ser esperados entre a fase e terra, sem limitação de descarregadores de sobretensões. Esses valores são apresentados para ligação e religação, de linhas em vazio, com fonte indutiva e mista. São descritos em p.u. com base em $\frac{\sqrt{2} \times U_S}{\sqrt{3}}$.

Tabela 4.1 – Valores de 2% da sobretensão de frente lenta, para a ligação de linhas.

	Fonte Indutiva		Fonte Mista	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
REN	2,9	1,77	2,6	1,6
CEI	2,9	1,9	2,6	1,3

Tabela 4.2 – Valores de 2% da sobretensão de frente lenta, para religação de linhas.

	Fonte Indutiva		Fonte Mista	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
REN	3,7	1,64	3,5	-
CEI	3,6	2,1	3,4	1,8

Devido à dificuldade de análise do gráfico apresentado pela CEI, admite-se que os valores apontados, possam ser ligeiramente diferentes dos valores obtidos por essa fonte. Acrescentada essa nota, verifica-se que os valores das sobretensões são muito aproximados e até mesmo iguais, para alguns dos valores máximos.

A limitação destas solicitações pode ser alcançada através de processos como:

- Escolha de disjuntores isentos de interrupção de arco, no corte de correntes capacitivas;
- Uso de resistências de pré-inserção nos disjuntores;
- Utilização de transformadores de medição de tensão indutivos, nas linhas, com capacidade para descarregar a carga retida, durante o tempo de religação.

4.1.4. Sobretensões de Frente Rápida (Atmosférica)

Este tipo de solicitação, tem como principal origem as descargas atmosféricas. Estas, podem ser diretas, quando atingem diretamente uma linha. Ou indiretas, quando atingem um local próximo à linha, como por exemplo um apoio ou cabo de guarda. Em qualquer dos casos é originada uma sobretensão, quer por descarga direta ou por indução eletromagnética, no caso de uma descarga indireta.

Normalmente, as induções devidas a uma descarga atmosférica, causam sobretensões abaixo dos 400 kV, nas linhas aéreas, tendo apenas significado para sistemas com tensão mais baixa. Devido à elevada suportabilidade do isolamento, os contornamentos inversos são menos prováveis para as tensões mais elevadas, sendo muito raros para sistemas com tensão igual, ou superior, a 500 kV.

Os documentos, recorrem à mesma onda convencional para efeitos de ensaio. Essa onda, é a onda normalizada de 1,2/50 μ s.

A limitação destas sobretensões, é alcançada através de um correto projeto das linhas. Dando-se especial relevo à correta aplicação de cabos de guarda, para descargas diretas. Assim como, a redução da impedância de terra dos apoios ou reforço do isolamento, para descargas indiretas.

A CEI, faz ainda referência à utilização de descarregadores de sobretensão, como proteção contra estas sobretensões. Apresenta aspetos, sobre os quais a aplicação de descarregadores depende:

- Amplitude e forma de onda da sobretensão;
- Característica de proteção do descarregador;
- Amplitude e forma de onda da corrente;
- Impedância característica e/ou capacitância do equipamento protegido;
- Distância entre o descarregador e o equipamento;

- Número e impedância característica das linhas conectadas.

Normalmente, são empregues descarregadores com as seguintes correntes nominais, de descarga:

- Para sistemas com U_m na classe I: 5 kA ou 10 kA;
- Para sistemas com U_m na classe II: 10 kA ou 20 kA.

4.1.5. Sobretensão de Frente Muito Rápida

Esta classe de sobretensão, apontada apenas pela CEI, caracteriza-se por ter origem em operações de abertura, ou defeitos, dentro de subestações isoladas a gás. Podem também, ocorrer em média tensão, quando existem ligações curtas entre os transformadores secos e o equipamento de manobra.

A forma destas sobretensões, é caracterizada por um aumento rápido da tensão perto do seu valor de pico, resultando num tempo de frente próximo de 0,1 μ s. Para operações de abertura, esta frente é normalmente seguida por uma oscilação com frequência acima de 1 MHz. A duração é inferior a 3 ms, mas pode ocorrer várias vezes. A amplitude depende da construção do equipamento de manobra e da configuração da subestação, podendo ser limitada a 2,5 p.u. É necessário ter a consciência que estas sobretensões podem criar outras, ainda maiores, em equipamentos ligados diretamente, tais como transformadores.

4.2. Tensão Suportável de Coordenação

4.2.1. Suportabilidade Dielétrica do Isolamento

Quando ocorre um aumento do esforço elétrico imposto a um isolante, para um nível elevado, a resistividade ao longo do caminho por entre o isolante irá ser alterado, para um valor próximo do dos condutores. Essa mudança provocará o colapso do isolamento [7].

O colapso ocorre em três fases principais:

- Ionização inicial de um ponto, ou conjunto de pontos;
- Aumento do canal ionizado ao longo do espaço;
- Ocorrência de contornamento e consequente descarga.

Existem vários fatores que influenciam a suportabilidade do isolamento, podendo-se salientar os seguintes:

- Tipo de sobretensão;
- Tipo de isolamento (gasoso, líquido ou sólido);
- Estado físico do isolamento (temperatura, pressão, outras condições atmosféricas e esforços mecânicos);
- Distribuição do campo elétrico no isolamento (homogéneo, não homogéneo, elétrodos e seu potencial);

- Deformação do isolamento sob esforço, efeitos químicos, efeitos na superfície do condutor, etc.

O colapso no ar é fortemente dependente da configuração do espaço no ar, da polaridade e forma da sobretensão aplicada. Adicionalmente, há ainda os efeitos provocados pelas condições atmosféricas.

As condições atmosféricas de referência, consideradas pelos documentos, são:

- Temperatura: 20°C;
- Pressão: 101,3 kPa (1013 mbar);
- Humidade Absoluta: 11 g/m³.

4.2.2. Probabilidade de Descarga Disruptiva do Isolamento

A descarga disruptiva do isolamento possui um carácter aleatório. Como tal, pode-se recorrer a uma distribuição probabilística para definição das tensões presumíveis de descarga.

Os dois documentos diferem neste assunto. A REN, segue uma função de distribuição normal, enquanto a CEI propõe a utilização de uma função de distribuição de Weibull.

A **CEI**, apresenta a formulação da distribuição de Weibull, para o isolamento autorregenerativo. Para o isolamento não autorregenerativo, ainda não existe um método que descreva a distribuição de probabilidade de descarga.

Para um determinado isolamento, para impulsos de uma determinada forma e diferentes valores de pico, U , a probabilidade de descarga, P , pode ser associada com todos os valores possíveis de U , estabelecendo-se uma relação de $P = P(U)$. A curva resultante pode ser definida pelos seguintes parâmetros:

- a) U_{50} : Tensão para a qual existe 50% de probabilidade do isolamento falhar, ou suportar o stress;
- b) Z : Desvio padrão, que representa a dispersão das tensões de contornamento. É definido como a diferença entre as tensões com probabilidade de contornamento de 50% e 16%.

$$Z = U_{50} - U_{16} \quad (4.1)$$

- c) U_0 : Tensão máxima abaixo da qual não existe possibilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva.

Normalmente, a função P é dada por uma função matemática (distribuição de probabilidade cumulativa) que é totalmente descrita pelos parâmetros, acima apresentados. Na distribuição gaussiana, o valor de U_{50} é também o valor médio e o desvio padrão é definido como apresentado na equação (4.1). Normalmente, o ponto de truncatura não é considerado de forma a simplificar os cálculos.

A equação, a seguir apresentada, representa a função cumulativa de Weibull com os parâmetros escolhidos de forma a igualar a distribuição gaussiana, de probabilidade cumulativa, nos valores de 50% e 16% de probabilidade de ruptura e trancar a distribuição a $U_{50} - NZ$.

$$P(U) = 1 - 0,5^{\left(1 + \frac{X}{N}\right)^{\gamma}}, \quad (4.2)$$

onde,

$$X = (U - U_{50})/Z;$$

X – Número de desvios padrão, correspondentes a U ;

N – Número de desvios padrão, correspondentes ao valor da tensão de truncatura, U_0 , para a qual $P(U_0) = 0$.

Para um desvio padrão da distribuição gaussiana ($X = -1$) $P(U) = 0,16$, na equação anterior. Se se definir $N = 4$, o valor de γ é 4,83. A aproximação deste valor para $\gamma = 5$ não induz um erro considerável, pelo que se pode definir:

$$P(U) = 1 - 0,5^{\left(1 + \frac{X}{4}\right)^5} \quad (4.3)$$

A norma, apresenta ainda uma expressão que permite descrever a distribuição de probabilidade suportável, em conjunto com o desvio. Essa relação, é obtida através do parâmetro U_{10} , em resultado da equação (4.2) e corresponde à probabilidade suportável de 90%.

$$U_{10} = U_{50} - 1,3Z \quad (4.4)$$

A **REN**, tal como já referido, recorre a uma função de distribuição gaussiana. Essa função é caracterizada por se encontrar truncada, nos valores limites previsíveis de sobretensão. É normal desprezar o efeito de truncatura, para assim se atingir uma maior facilidade de cálculo.

$$f_o(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_u} \times e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{U - m_u}{\sigma_u} \right)^2}, \quad (4.5)$$

onde,

σ_u – Desvio padrão das sobretensões;

m_u – Valor médio das sobretensões

Pode-se, então, definir a probabilidade de descarga como:

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{V - U_{50}}{\sigma} \right)^2} dV, \quad (4.6)$$

onde,

σ – Desvio padrão relativo à distribuição de probabilidade de descarga disruptiva;

U_{50} – Valor médio, definido de forma idêntica ao de σ ;

Ambos, os documentos, apresentam ainda uma forma de cálculo do desvio padrão. Adotando a nomenclatura da CEI, apresentam-se as seguintes expressões.

– Descarga Atmosférica:

$$Z = 0,03 \times U_{50} \quad (4.7)$$

– Manobra:

$$Z = 0,06 \times U_{50} \quad (4.8)$$

As expressões, já apresentam a influência das condições atmosféricas.

Comparativamente, a função de Weibull apresenta mais vantagens. Permite uma maior facilidade de cálculo, assim como já considera os valores de truncatura na sua definição matemática.

Contudo, apesar das diferenças entre as duas funções, ambas apresentam valores muito aproximados. Sendo essa semelhança visível na figura seguinte.

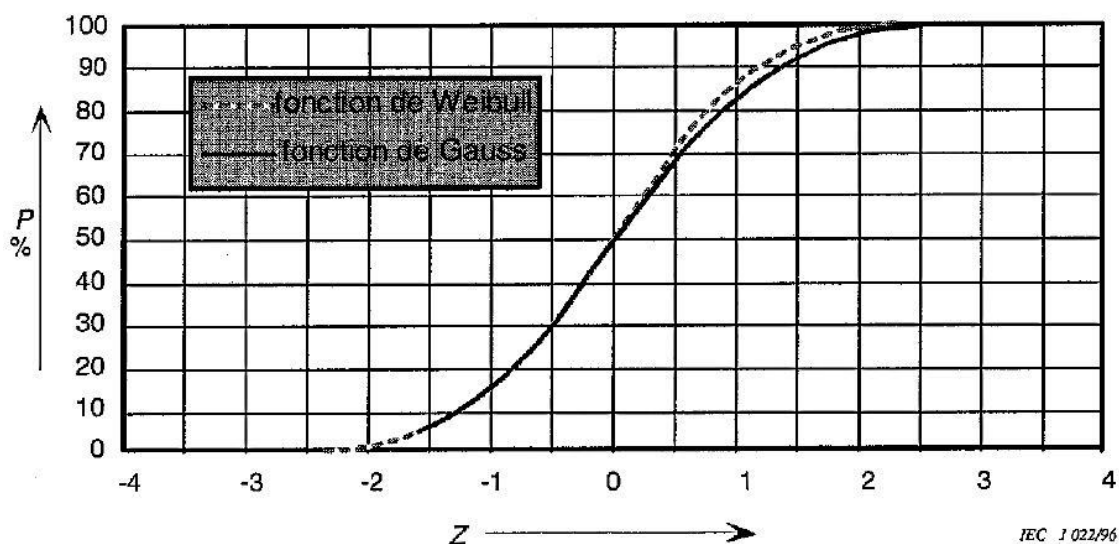


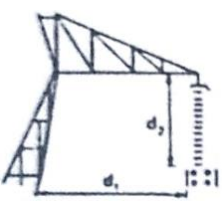
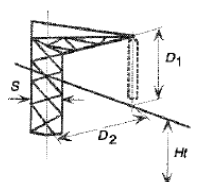
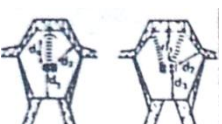
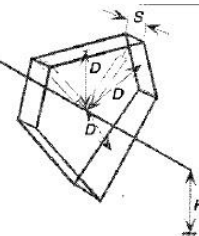

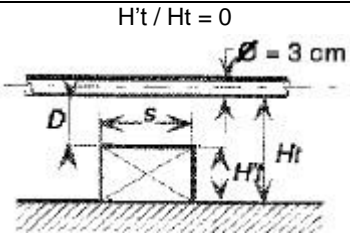

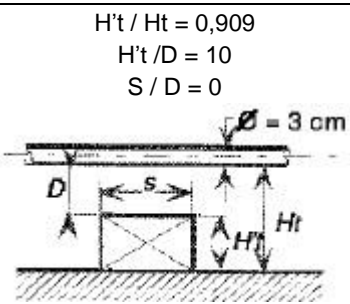

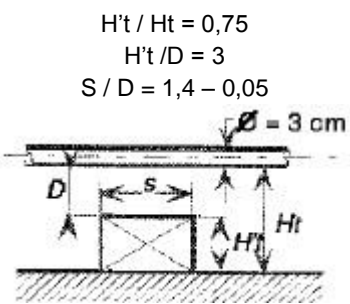
Figura 4.1 – Variação de probabilidade da função de Weibull e de Gauss [7].

4.2.3. Cálculo das Tensões de Descarga dos Intervalos de Ar

Os dois documentos apresentam fórmulas de cálculo, com base em resultados experimentais, para as tensões de descarga dos intervalos de ar. Como tal, ir-se-á comparar as duas propostas e verificar as diferenças entre elas.

Antes de mais, é importante referir que o intervalo de base é a configuração ponta-plano, sendo possível estimar o comportamento para outras configurações, através de um fator de intervalo, K. De seguida, apresentam-se duas tabelas, uma com a comparação dos fatores aplicados pelos documentos, para algumas configurações fase-terra, e outra com o fator α para fase-fase.

Tabela 4.3 – Fatores de intervalo para solicitações fase-terra, REN e CEI.

Tipo de Intervalo	Configuração REN	Configuração CEI	Fator de Intervalo REN (K_r)	Fator de Intervalo CEI (K)
Condutor-Apoio			1,50	1,45
Condutor-janela			1,20	1,25
Condutor-plano			1,10	1,15
Condutor-ponta			2,08 ¹⁶	1,47
Condutor-estrutura			1,25 – 1,40 ¹⁷	1,18 – 1,35

¹⁶ $h / d = 10$.

¹⁷ $m / d = 1,4$; $m / d = 0,05$.

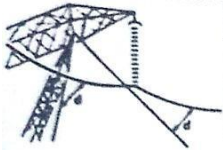
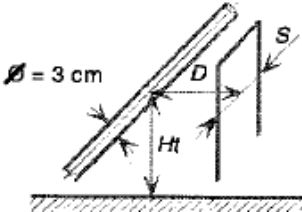
Tipo de Intervalo	Configuração REN	Configuração CEI	Fator de Intervalo REN (K_+)	Fator de Intervalo CEI (K)
Condutor-estrutura lateral			1,45	1,45

Tabela 4.4 – Fatores de intervalo para geometrias típicas fase-fase.

Configuração	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,33$
Anel-anel	1,80	1,70
Condutores cruzados	1,65	1,53
Condutor-condutor Ponta-ponta horizontal	1,62	1,52
Tubo-tubo de barramento	1,50	1,40
Geometrias assimétricas	1,45	1,36

• **Resposta do isolamento ao regime permanente**

A **CEI** define a tensão com probabilidade de 50% de falha, como:

$$U_{50RP} = 750 \times \sqrt{2} \times \ln(1 + 0,55 \times d^{1,2}) \quad (4.9)$$

O valor eficaz de U_{50RP} , sob tensões em regime permanente, é cerca de 20 a 30% maior que o valor correspondente sobre impulso de manobra positivo, para um tempo de subida crítico. A suportabilidade pode ser assumida como 90% de U_{50} , baseada num desvio padrão de 3%.

Para outras configurações, de intervalos de ar, a **CEI** apresenta a seguinte informação:

- Muito baixa, para intervalos até um 1 metro;
- Para intervalos maiores que 2 metros:

$$U_{50} = U_{50RP} \times (1,35K - 0,35K^2) \quad (4.10)$$

- Para intervalos de ar entre 1 e 2 metros pode-se recorrer à expressão geral, tendo em consideração que os resultados serão conservadores.

A **REN**, apresenta as seguintes expressões, para distâncias entre os 2 e 15 metros:

$$\begin{aligned}
 U_{m_{fi}} &= K_{fi} \times \frac{3400 / \sqrt{2}}{1 + 8/d} \\
 K_{fi} &= 1,1K_+ \\
 \sigma_{fi} &= 0,03 \times U_{m_{fi}}
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Considerando a configuração ponta-plano, onde o fator de intervalo toma o valor unitário, é assim possível traçar um gráfico comparativo. É importante referir, que os valores das distâncias são medidos em metros e os da tensão em kV, valor eficaz.

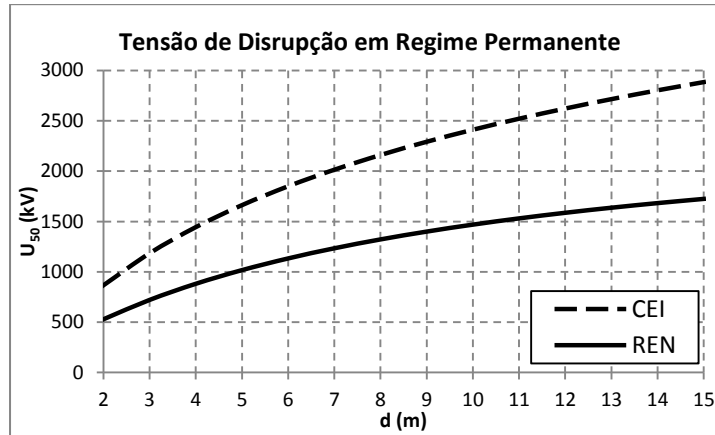


Figura 4.2 – Comparação das tensões de disrupção dos intervalos de ar, em regime permanente.

Verifica-se que a CEI apresenta valores superiores, para a tensão de disrupção do isolamento. Logo, quer isto dizer que a disrupção do isolamento ocorre para uma tensão superior, o que se traduz numa redução das distâncias no ar.

- **Resposta do isolamento a sobretensões de frente lenta**

A **CEI** apresenta, para intervalos de ar até 25 metros e para polaridade positiva, a seguinte expressão:

$$U_{50RP} = 1080 \times \ln(0,46 \times d + 1) \quad (4.12)$$

Para impulsos de manobra padrão, a seguinte fórmula apresenta uma melhor aproximação:

$$U_{50RP} = 500 \times d^{0,6} \quad (4.13)$$

As duas expressões, apresentadas, são aplicadas para o nível do mar. Como tal, quando fora desse nível, é necessário aplicar a correção correspondente.

Para outras configurações, aplica-se o fator de intervalo. Ou seja:

$$U_{50} = K \times U_{50RP} \quad (4.14)$$

Note-se que, para $K \geq 1,45$ a tensão de contornamento sobre polaridade negativa pode-se tornar mais pequena que para polaridade positiva.

Para configurações fase-fase, um fator similar deve ser aplicado. Neste caso, o fator de intervalo é influenciado pela configuração do intervalo e pelo rácio α , definido como:

$$\alpha = \frac{u_-}{u_- - u_+}, \quad (4.15)$$

onde, u_- e u_+ , representam os valores eficazes da componente negativa e positiva, respetivamente.

A **REN**, apresenta duas expressões para duas gamas de intervalos de ar, uma para os 2 a 15 metros e outra para os 15 a 30 metros:

$$\begin{aligned} U_{50_m} &= K_+ \times \frac{3400}{1 + 8/d}, \quad 2m < d < 15m \\ U_{50_m} &= K_+ \times (1400 + 55 \times d), \quad 15m < d < 30m \\ \sigma_m &= 0,06 \times U_{50_m} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Já para a onda de choque de polaridade negativa, dos 2 a 15 metros, apresenta a seguinte formula:

$$\begin{aligned} U_{50_m} &= K_- \times \frac{3400}{1 + 8/d} \\ \sigma_m &= 0,06 \times U_{50_m} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Tal como a CEI, a REN afirma que a relação entre K_- e K_+ não é simples, uma vez que K_- diminui para os valores crescentes de K_+ . Pelo que, as tensões disruptivas à onda de manobra negativa tornam-se inferiores às da onda positiva. A REN, afirma que esse efeito se verifica para fatores de intervalo acima de 1,5 a 1,7.

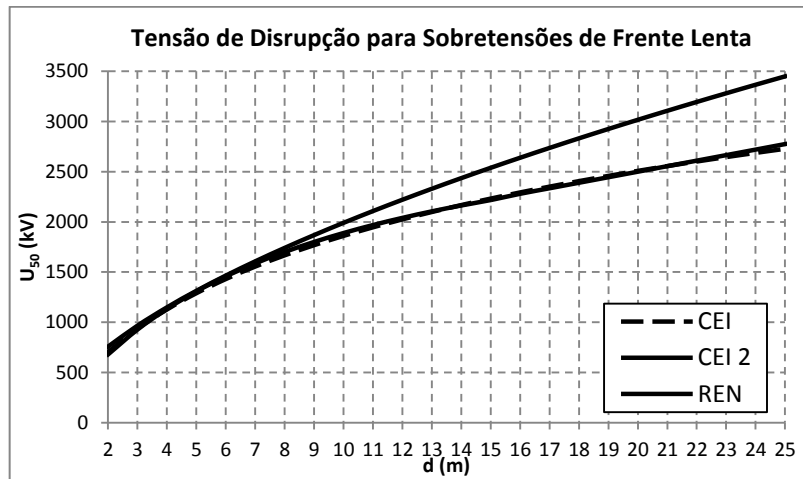


Figura 4.3 – Comparação das tensões de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente lenta.

Note-se que, para valores de distâncias no ar a partir de 8 metros, a tensão correspondente à segunda expressão da CEI é muito superior quer à primeira, quer à da REN. Já entre a REN e a primeira expressão da CEI, verificam-se valores concordantes.

- **Resposta do isolamento a sobretensões de frente rápida**

Sobre impulsos de frente rápida, a suportabilidade com polaridade negativa, de um intervalo ponta-plano, é muito maior que com polaridade positiva.

Para impulsos atmosféricos padrão, aplicados em intervalos de ar ponta-plano de 1 a 10 metros, a suportabilidade de polaridade positiva pode ser aproximada, segundo a **CEI**, pela seguinte expressão:

$$U_{50RP} = 530 \times d \quad (4.18)$$

Em geral, os fatores de intervalo aplicáveis para impulsos de manobra, não são diretamente utilizáveis para suportabilidade a impulsos atmosféricos. No entanto, resultados experimentais têm demonstrado que, para a polaridade positiva, o gradiente de colapso para um intervalo de ar geral, em por unidade do gradiente de colapso para um intervalo ponta-plano, aumenta linearmente com o fator [7].

O fator de intervalo, K_{ff}^+ , para impulsos atmosféricos de polaridade positiva pode ser aproximado, em termos do fator de intervalo de impulso de manobra.

$$K_{ff}^+ = 0,74 + 0,26 \times K \quad (4.19)$$

Para intervalos de ar, os desvios padrão considerados são de 3 e 5%, para impulsos positivos e negativos, respetivamente. Quando estão presentes isoladores, o desvio padrão considerado varia de 5 a 9%. Para outros casos, um valor aproximado aos intervalos de ar é aplicado.

Para altitudes diferentes do nível do mar, é necessário proceder à correção de altitude.

A expressão proposta pela **REN** é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} U_{50_a} &= K_{a+} \times d \\ K_{a+} &= 360 + 150 \times K_+ \\ \sigma_a &= 0,03 \times U_{50_a} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Do gráfico, a seguir apresentado, verifica-se uma similaridade entre os valores apresentados pela CEI e pela REN. No entanto, a expressão proposta pela norma fornece sempre valores, de tensão de disrupção, acima dos obtidos pela expressão do guia da REN. Sendo, por isso, mais favorável.

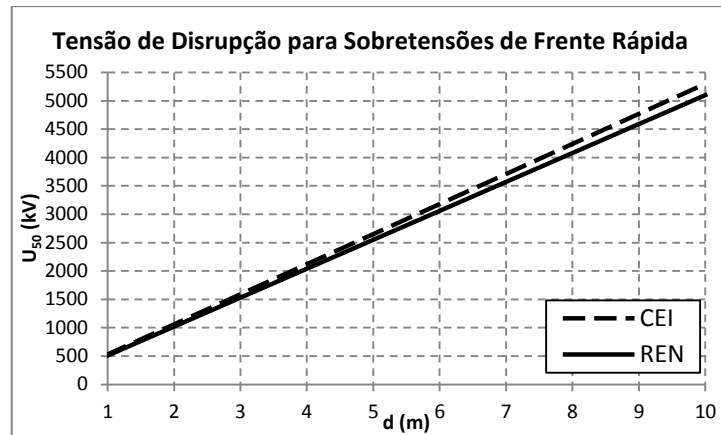


Figura 4.4 – Comparação das tensões de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente rápida.

4.2.4. Análise das Tensões de Descarga dos Intervalos de Ar

Tal como referido, a análise anterior foi realizada com base no intervalo ponta-plano. De forma a comparar, as duas formulações, para outros intervalos de ar apresenta-se, de seguida, a comparação entre as duas entidades, com base nos fatores de intervalo condutor-apoio e condutor-janela.

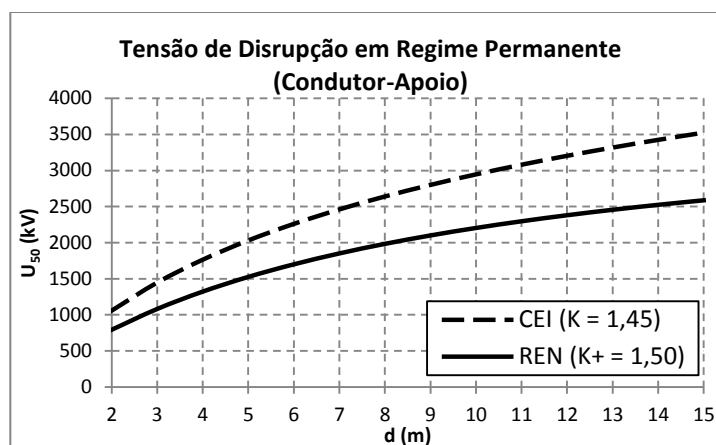


Figura 4.5 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, em regime permanente e configuração condutor-apoio.

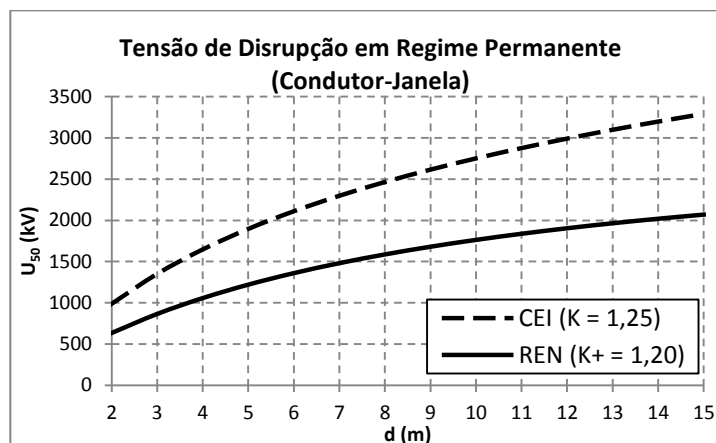


Figura 4.6 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, em regime permanente e configuração condutor-janela.

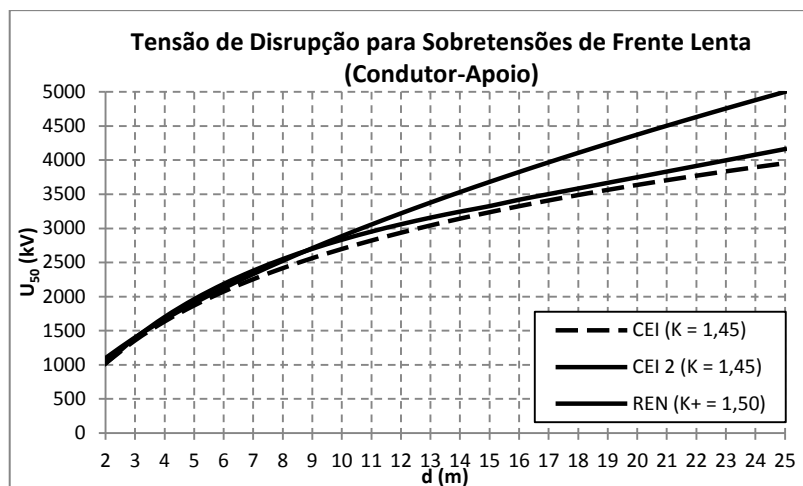


Figura 4.7 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente lenta e configuração condutor-apoio.

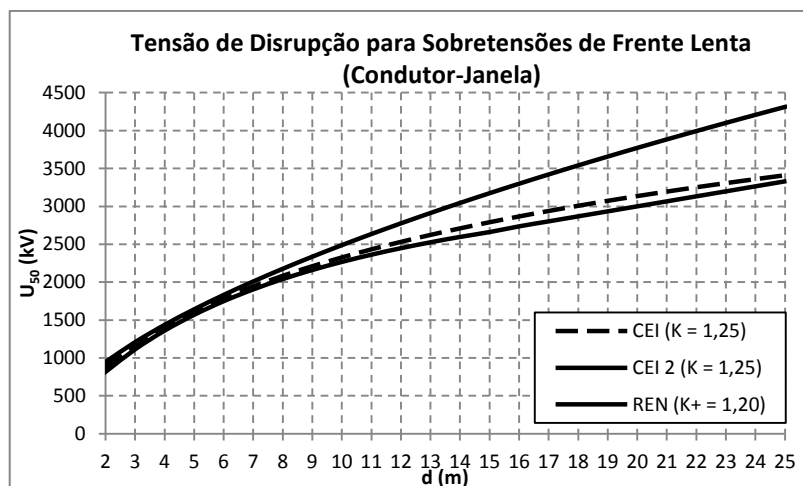


Figura 4.8 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente lenta e configuração condutor-janela.

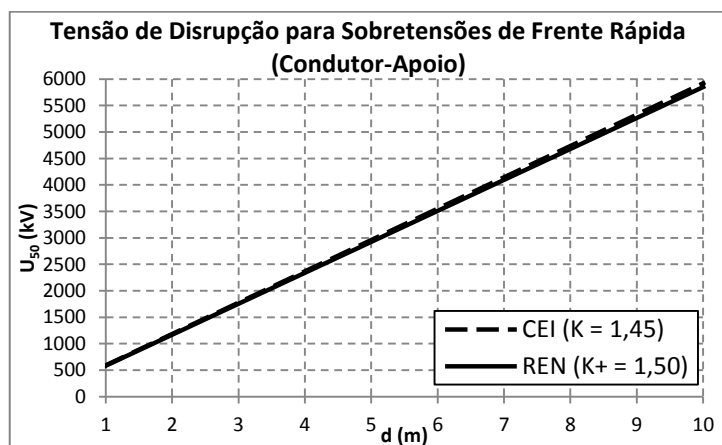


Figura 4.9 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente rápida e configuração condutor-apoio.

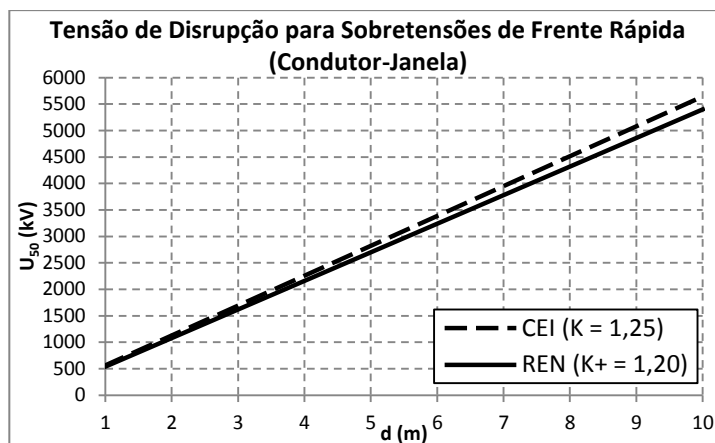


Figura 4.10 – Comparação da tensão de disrupção dos intervalos de ar, para sobretensões de frente rápida e configuração condutor-janela.

Tal como se verifica, para as duas configurações, a CEI propõe sempre valores superiores aos propostos pela REN. Havendo uma pequena exceção, para as sobretensões de frente lenta com configuração condutor-apoio. Onde a REN, propõe valores superiores à primeira expressão da CEI. No entanto, a segunda expressão apresenta valores superiores.

Verifica-se que, com a diminuição dos fatores de intervalo, há uma diminuição dos valores das tensões de disrupção, para uma mesma distância. Ou seja, para as configurações com fator de intervalo inferior, as distâncias terão de ser maiores de forma a garantir a mesma tensão de disrupção.

4.2.5. Critério de Desempenho

É crucial que um sistema elétrico possua um bom desempenho, mas devido a limitações económicas nunca é possível obter o desempenho ideal. É aqui que é necessário definir o que se considera um desempenho aceitável.

Através do nível de falha, a CEI propõe alguns valores considerados aceitáveis. O desempenho do isolamento é, então, baseado no número de falhas, durante o serviço. São propostas taxas de falha, devidas a sobretensões, na ordem de 0,001/ano até 0,004/ano, dependendo dos tempos de reparação. Para as descargas atmosféricas, admite-se uma taxa de 0,1/100 km/ano até 20/100 km/ano, correspondendo a última a linhas de distribuição. Por último, para sobretensões de manobra, são aceitáveis taxas entre 0,001 e 0,01 por operação.

4.3. Procedimentos para Coordenação de Isolamento

A determinação, das tensões suportáveis de coordenação, consiste na obtenção dos valores mais baixos das tensões suportáveis do isolamento, atendendo ao critério de desempenho quando sujeito às sobretensões representativas, sob condições de serviço [7].

São aplicados dois métodos, para a coordenação de isolamento, para sobretensões transitórias. Esses métodos, apresentados a seguir, são o método determinístico e o método estatístico, ou probabilístico.

4.3.1. Método Determinístico

O método determinístico é, normalmente, utilizado quando não existe informação estatística disponível, obtida através de testes das taxas de falha do equipamento.

O método, parte da determinação da tensão máxima, que ameaça o equipamento, e depois obtém a mínima suportabilidade dielétrica, do mesmo, com uma margem que cobrirá as incertezas inerentes à determinação desses valores. A tensão suportável de coordenação é obtida pela multiplicação do valor máximo assumido, correspondente à sobretensão representativa, por um fator de coordenação determinístico, k_{cd} .

Para equipamento protegido por descarregadores de sobretensão, a sobretensão máxima assumida é igual ao nível de proteção a impulsos de manobra, U_{ps} , do descarregador. No entanto, em alguns casos, uma distorção grave da distribuição estatística das sobretensões, pode ocorrer. Para cobrir esse efeito é proposto, pela CEI, que se avalie o fator de coordenação determinístico, em função da relação entre o nível de proteção a impulsos de manobra do descarregador e o valor de 2% da sobretensão fase-terra, U_{e2} . Essa dependência é estabelecida pela figura, a seguir apresentada.

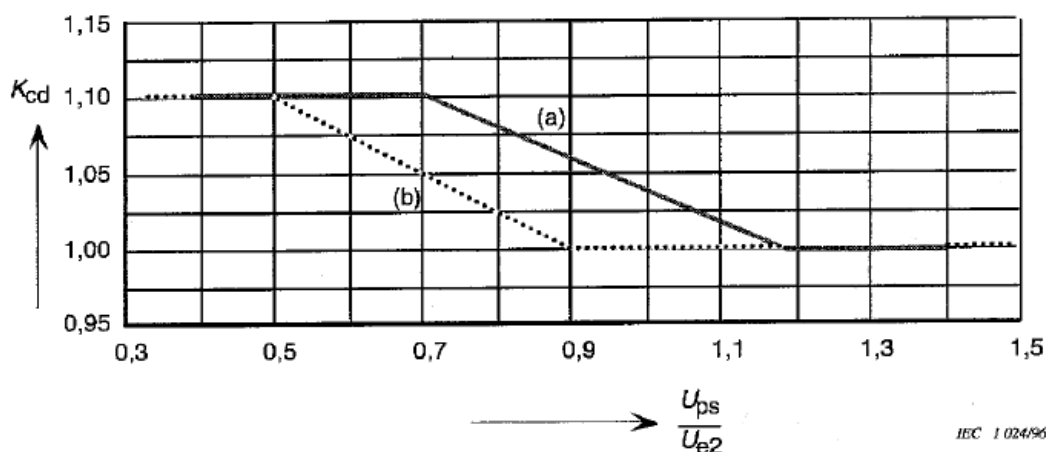


Figura 4.11 – Avaliação do fator de coordenação determinístico, k_{cd} [7].

- (a) Fator de coordenação aplicado para o nível de proteção do descarregador de forma a obter a tensão suportável de coordenação fase-terra (aplicado também para isolamento longitudinal);
- (b) Fator de coordenação aplicado para o dobro do nível de proteção do descarregador de forma a obter a tensão suportável de coordenação fase-fase.

A REN descreve o modelo determinístico, ou convencional, com base num fator de segurança convencional, γ_c :

$$\gamma_c = \frac{\text{Tensão suportável convencional}}{\text{Sobretensão máxima convencional}} \quad (4.21)$$

As tensões suportáveis convencionais deverão ser, sempre, iguais ou superiores às tensões suportáveis nominais, do equipamento.

Ambos, os documentos, apresentam valores para o fator de coordenação determinístico, sendo estes apresentados na tabela.

Tabela 4.5 – Valores do fator de coordenação determinístico, REN e CEI.

Sobretensão	CEI	REN
Frente Rápida (Atmosférica)	1	1,2: 72,5 a 245 kV 1,25: > 420 kV
Frente Lenta (Manobra)	1	1,15: > 420 kV

A REN, não faz referência ao fator mínimo a aplicar para tensões, mais elevadas, abaixo dos 420 kV, para as sobretensões de frente lenta.

Analisando a tabela, verifica-se que a CEI apresenta valores, para os fatores, abaixo dos da REN. No entanto, com a aplicação posterior de fatores de segurança, por parte da CEI, essa diferença acaba por ser atenuada, não havendo grande disparidade entre os dois documentos.

4.3.2. Método Estatístico

Tal como já referido, os dois documentos divergem na função de distribuição acumulada. A REN recorre a uma distribuição gaussiana, enquanto a CEI utiliza uma função de Weibull. Apesar dessa diferença, ambos definem o risco de falha do isolamento como:

$$R = \int_0^{\infty} f_o(U) \times P(U) \partial U \quad , \quad (4.22)$$

onde,

R – Risco de falha do isolamento;

$f_o(U)$ – Função densidade de probabilidade das sobretensões;

$P(U)$ – Probabilidade acumulada de disrupção, do isolamento, sob um impulso de valor U.

Através do método simplificado, é possível relacionar o risco falha com o fator de segurança estatístico, descrito pela CEI como k_{cs} e pela REN como γ . Esse fator, é definido através da:

- Sobretensão estatística – correspondente a 2% de probabilidade de ser excedida (REN: U_s ; CEI: U_{e2});
- Sobretensão suportável estatística – correspondente a 90% de probabilidade de ser suportada (REN: U_w ; CEI: U_{cw}).

O fator é, então, definido como:

$$\begin{aligned} REN : \gamma &= \frac{U_w}{U_s} \\ CEI : k_{cs} &= \frac{U_{cw}}{U_{e2}} \end{aligned} \quad (4.23)$$

São apresentados, pelos dois documentos, exemplos que traduzem a relação entre o risco de falha e o fator estatístico, através de um gráfico. A REN apresenta, essa relação para um elemento de isolamento, com base num desvio padrão para a distribuição de sobretensões de 25% e de 8% para a probabilidade de falha, do isolamento.

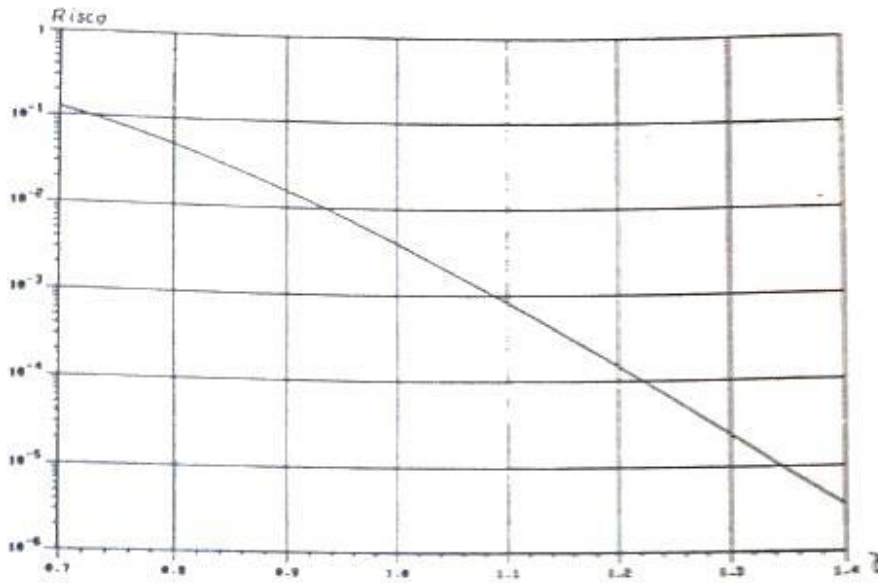


Figura 4.12 – Relação entre risco de falha e fator estatístico, REN [12].

A REN propõe, para distribuições gaussianas, expressões de cálculo para U_w e U_s :

$$\begin{aligned} U_w &= (1 - 1,3 \times \sigma) \times U_{50} \\ U_s &= (1 + 2 \times \sigma_u) \times m_u \end{aligned} \quad (4.24)$$

onde,

σ_u – Desvio padrão das sobretensões;

m_u – Valor médio das sobretensões;

σ – Desvio padrão relativo à distribuição de probabilidade de descarga disruptiva;

U_{50} – Valor médio, definido de forma idêntica ao de σ .

A CEI apresenta, essa relação, para sobretensões de frente lenta com base em dois métodos, relativos ao número de sobretensões por operação de manobra. Esses métodos são o “*phase-peak*”¹⁸ e o “*case-peak*”¹⁹.

¹⁸ Para cada operação de manobra o maior valor de pico da sobretensão, para cada fase-terra ou entre cada combinação de fases, é incluído na distribuição de probabilidade da sobretensão.

¹⁹ Para cada operação de manobra o maior valor de pico da sobretensão, para todas as fases à terra ou entre todas as fases, é incluído na distribuição de probabilidade da sobretensão.

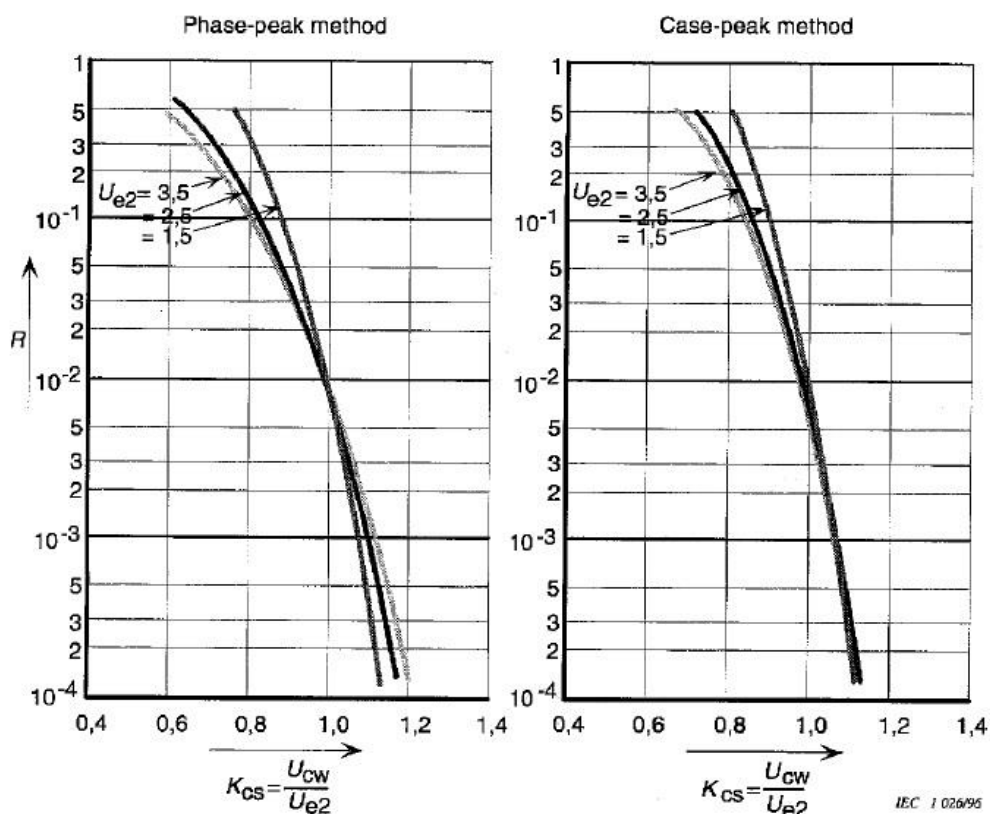


Figura 4.13 – Relação entre risco de falha e fator estatístico, CEI [7].

Verifica-se que, tanto para a REN como para a CEI, quanto maior o desempenho pretendido, maior será o fator a aplicar.

Pela análise dos gráficos da CEI, verifica-se que o fator estatístico toma o valor unitário, para um risco de falha de 10^{-2} . A REN aponta, para o mesmo risco, um fator na ordem dos 0,94. Apesar da difícil comparação, entre os dois documentos, devido às possíveis diferenças das considerações base tomadas, pode-se concluir que os fatores propostos são concordantes.

4.3.3. Risco de Falha do Isolamento

Pretende-se agora, estudar o risco de falha com base nos fatores que o influenciam. Ou seja, verificar a influência de fatores como as funções de distribuição, o valor da tensão de descarga do isolamento e o desvio padrão da probabilidade de descarga disruptiva.

- Funções de distribuição

Através das formulações, já apresentadas para a distribuição de Weibull e de Gauss, é possível construir uma representação gráfica que torne mais perceptíveis as diferenças, entre os dois métodos.

Irão ser apresentados dois gráficos, onde são considerados diferentes valores para a tensão de ruptura, de forma a verificar se as diferenças entre as duas funções se mantêm, com a variação da tensão.

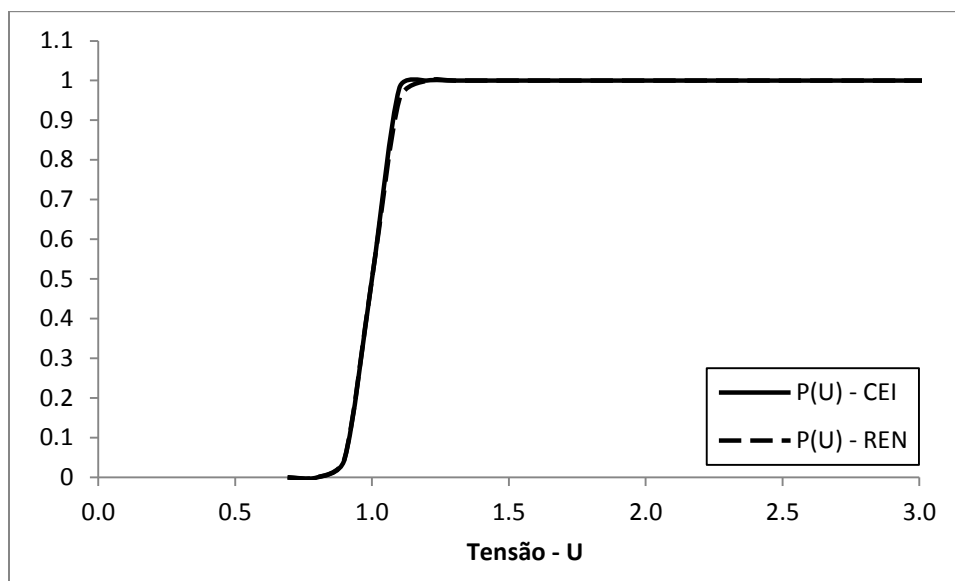


Figura 4.14 – Probabilidade de descarga de um isolamento, $U_{50} = 1$; $\sigma = 6\%$.

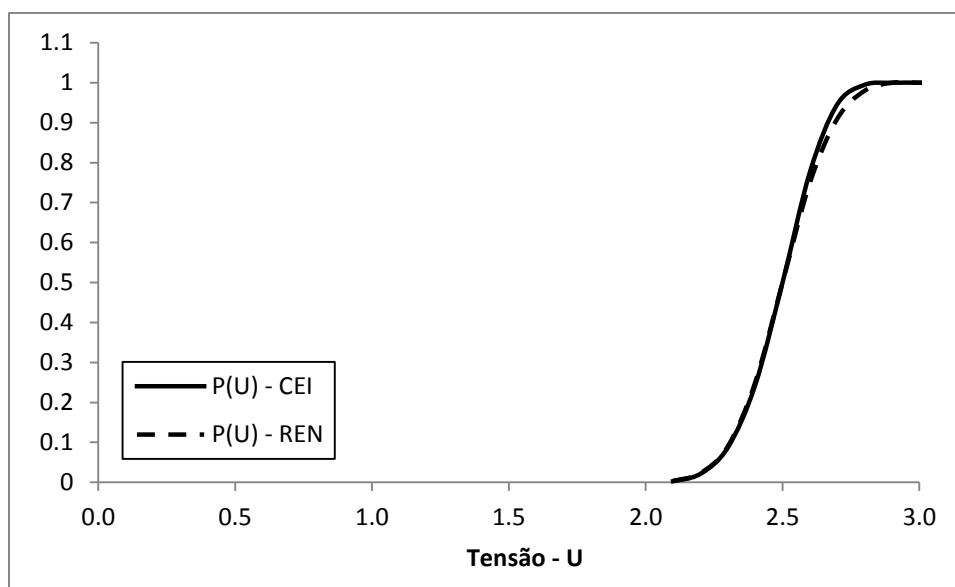


Figura 4.15 – Probabilidade de descarga de um isolamento, $U_{50} = 2,5$; $\sigma = 6\%$.

Verifica-se que os valores apresentados, pelos dois métodos, são bastante coerentes. Não há uma diferença considerável, entre os mesmos. Como tal, irá ser utilizado a função de Weibull para continuar o estudo, pois apresenta uma maior facilidade de cálculo.

Com a mudança do valor de U_{50} a curva da probabilidade deslocou-se na horizontal, tal como se esperava.

Como as curvas da suportabilidade, para os dois métodos, são muito parecidas, espera-se que o risco de cedência, para ambos, seja também concordante. É mesmo isso que se verifica,

pela figura, a seguir apresentada. Onde o risco de cedência do isolamento, quando exposto a uma solicitação, é praticamente o mesmo.

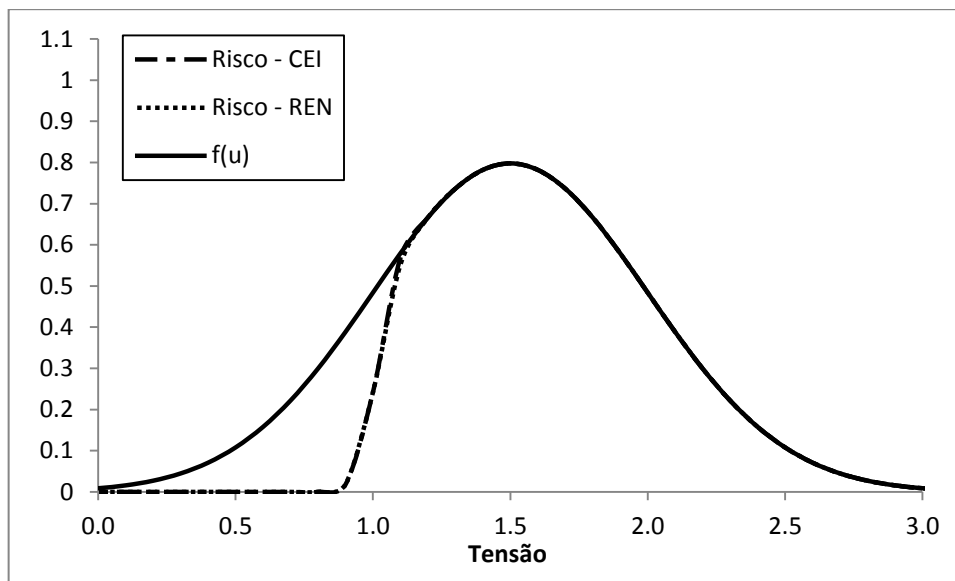


Figura 4.16 – Risco de falha de um isolamento, CEI e REN. $U_{50} = 1$; $\sigma = 6\%$; $m_u = 1,5$; $\sigma_u = 0,5$.

- Tensão de descarga do isolamento

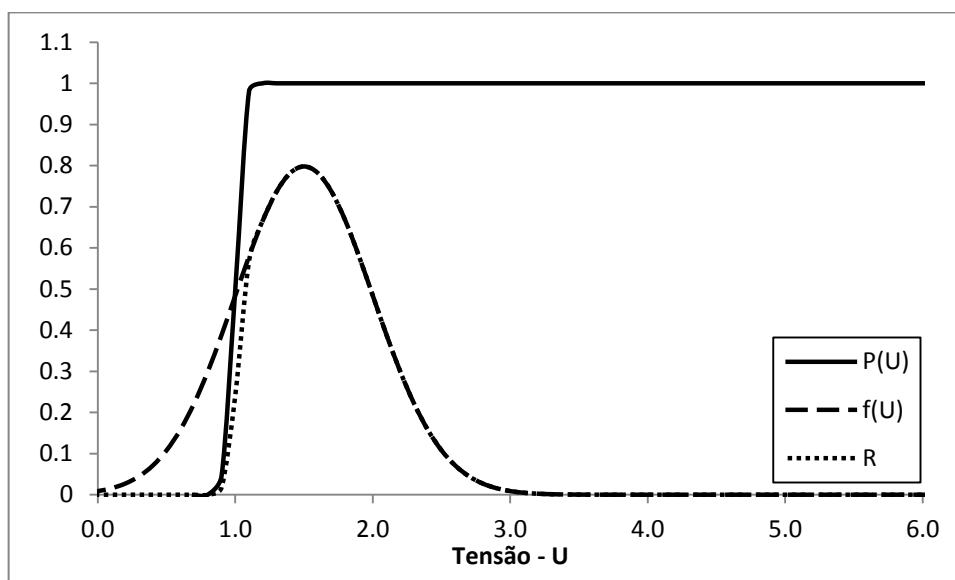


Figura 4.17 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 1$; $\sigma = 6\%$; $m_u = 1,5$; $\sigma_u = 0,5$.

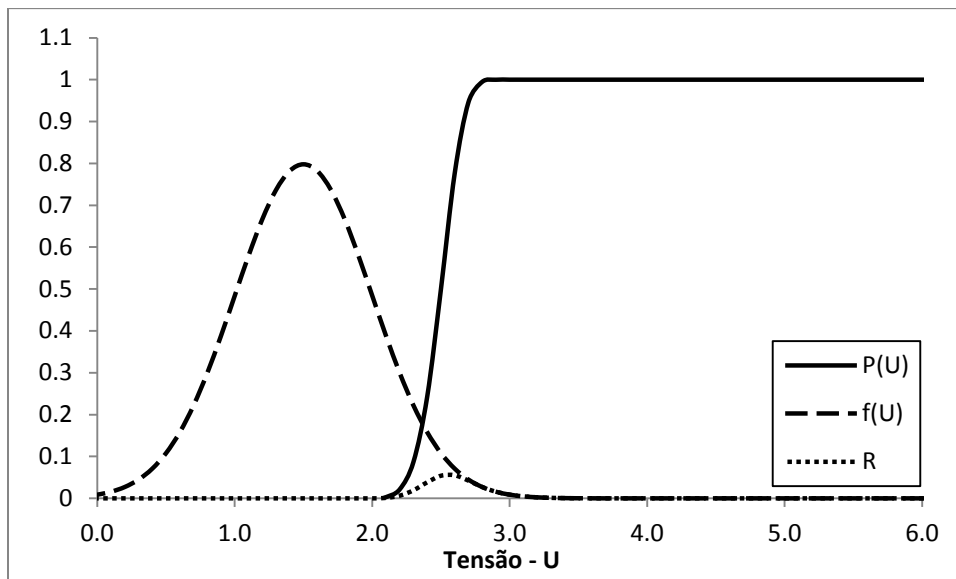


Figura 4.18 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 2,5$; $\sigma = 6\%$; $m_u = 1,5$; $\sigma_u = 0,5$.

Com o aumento da tensão de descarga do isolamento, diminui o risco de falha do mesmo. Esse efeito seria de esperar, uma vez que o aumento da tensão significa um aumento da suportabilidade do isolamento. Se o valor da suportabilidade aumenta e o valor da sobretensão se mantém, o isolamento terá uma menor probabilidade de falha.

- Desvio padrão da probabilidade de descarga disruptiva

Através da alteração do desvio, irá ser observado o efeito no risco de falha do isolamento.

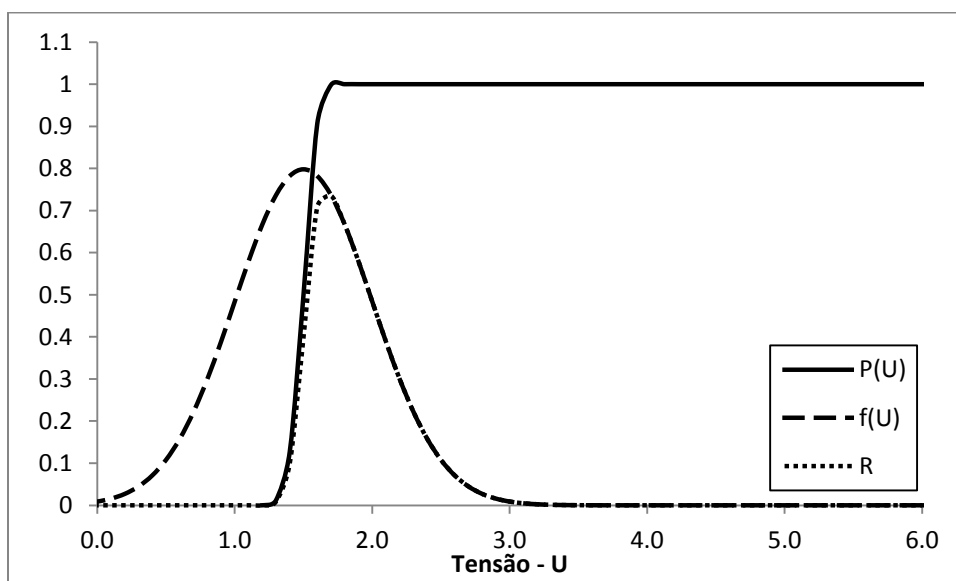


Figura 4.19 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 1,5$; $\sigma = 6\%$; $m_u = 1,5$; $\sigma_u = 0,5$.

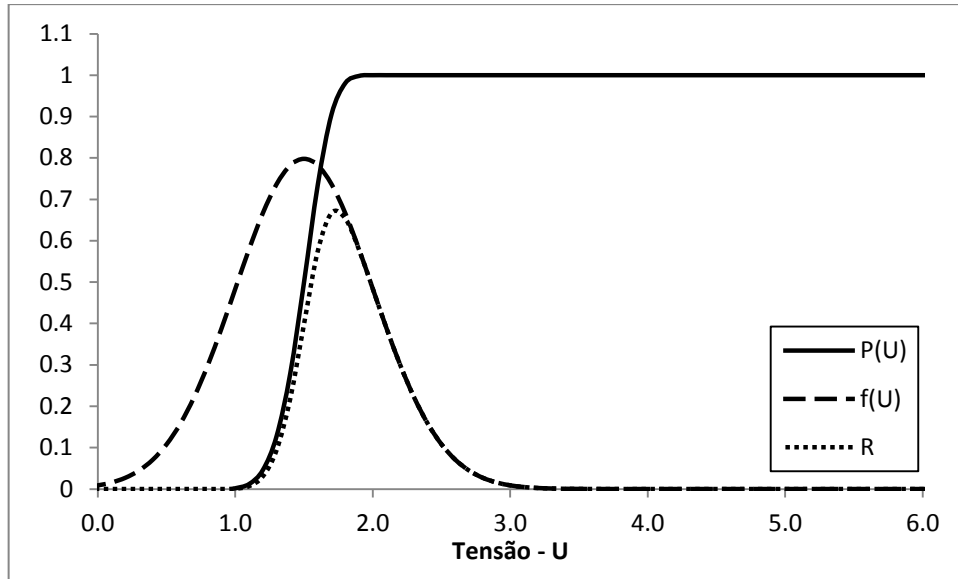


Figura 4.20 – Risco de falha de um isolamento, $U_{50} = 1,5$; $\sigma = 12\%$; $m_u = 1,5$; $\sigma_u = 0,5$.

Um aumento do desvio, provoca uma diminuição do declive da curva da suportabilidade, do isolamento, e como tal uma consequente baixa do risco de falha.

4.4. Tensão Suportável Requerida

Este passo, apresentado pela CEI, tem como objetivo realizar a correção dos valores obtidos. Assim, pretende-se compensar algumas condições que influenciam o desempenho do isolamento, através da aplicação de fatores de correção. A CEI, aplica fatores de correção de altitude e de segurança, enquanto a REN apenas realiza a correção de altitude.

4.4.1. Correção de Altitude

A **CEI** realiza esta correção com base na pressão atmosférica. Sendo o fator de correção, k_a , obtido através da seguinte expressão:

$$k_a = e^{m \left(\frac{H}{8150} \right)}, \quad (4.25)$$

A fórmula apresentada já foi abordada, anteriormente, sendo descrita de forma mais completa em 3.1.3.

A **REN**, propõe uma correção baseada em dois fatores. k_d , fator de correção da densidade do ar e k_h , fator de correção da humidade do ar.

$$k_d = \left(\frac{b}{b_0} \right)^m \times \left(\frac{273 + t_0}{273 + t} \right)^n, \quad (4.26)$$

onde,

b, b_0 – Pressões atmosféricas em mbar;

t, t_0 – Temperatura atmosférica em graus Celsius;

t_0, b_0 – Valores de referência, para a temperatura e pressão, respetivamente.

$$k_h = (k)^w, \quad (4.27)$$

k depende da humidade. É dado em função do rácio entre a humidade absoluta, h , e a densidade relativa do ar, δ . Os valores de k podem ser consultados em anexo, A2.2.

Os expoentes m, n e w dependem da natureza, polaridade da onda e distância de escorvamento, estando compreendidos entre 0 e 1. Os valores de m e w são dados em anexo, A2.2. Para análise mais detalhada, consultar 3.2.2.

Por fim, a REN, realiza a correção para a atmosfera de ensaio, V_E , relativamente à atmosfera de referência, V_R .

$$V_E = \frac{k_d}{k_h} \times V_R, \quad (4.28)$$

4.4.2. Fator de Segurança

Adicionalmente, a CEI, apresenta um fator de segurança, k_s , a aplicar para assegurar situações como as descritas em 3.1.3. Os valores sugeridos são:

- $k_s = 1,15$ para isolamento interno;
- $k_s = 1,05$ para isolamento externo.

4.5. Distâncias no Ar

Após a avaliação realizada às diferenças, mais generalizadas, entre o guia da REN e a CEI, pretende-se agora estudar diferenças mais concretas, entre ambos. Para isso, irão ser analisadas as distâncias no ar, para isolamento dos condutores.

O processo de coordenação de isolamento é semelhante, para os dois guias. No entanto, as distâncias no ar são obtidas de forma diferente. No método da CEI, após o cálculo das tensões suportáveis de coordenação, afetadas por fatores de correção, normalizam-se as mesmas através das tabelas 2 e 3 da norma 60071-1, em conjunto com a tensão mais elevada do sistema. Com base nessas tabelas, é possível obter todas as distâncias no ar, a partir das tabelas do Anexo A, da norma 60071-2. A REN, apresenta uma metodologia diferente, onde é realizado o cálculo para cada tipo de distância no ar.

4.5.1. Cadeia de Isoladores

O número de isoladores a utilizar, numa cadeia, depende do comprimento da linha de fuga. Essa linha, é definida com base na solicitação à frequência industrial e nas condições de poluição, que se fazem sentir no local da instalação.

Ambos os documentos, definem os níveis de poluição de forma concordante. Na tabela, a seguir apresentada, definem-se esses níveis assim como a linha de fuga específica, para cada um deles.

Tabela 4.6 – Caracterização dos níveis de poluição e linhas de fuga específica [12].

Nível de Poluição	Exemplos característicos do meio ambiente	Linha de fuga específica (mm/kV)
Ligeira	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas sem indústria e com fraca densidade de habitação, equipadas com instalações de aquecimento poluentes; - Zonas com fraca densidade industrial ou de habitações, mas submetidas a ventos ou chuva frequente; - Regiões agrícolas; - Regiões montanhosas; - Todas estas zonas devem ser situadas longe do mar (pelo menos 20km) e não devem em algum caso estar expostas aos ventos vindos do mar. 	16,0
Média	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas com indústrias não produtoras de fumos, particularmente poluentes, ou com densidade média de habitações equipadas com instalações de aquecimento poluentes; - Zonas com forte densidade de habitações ou indústrias, mas submetidas a ventos frequentes e não poluentes, ou de forte pluviosidade; - Zonas expostas a ventos marítimos, mas não demasiado próximas da costa (distância não inferior a 3km). 	20,0
Forte	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas de grande densidade de indústrias e arredores de grandes cidades com forte densidade de instalações de aquecimento poluentes; - Zonas próximas do mar, ou em qualquer caso expostas a ventos marítimos relativamente fortes (distâncias da ordem de 1 a 3 km). 	25,0
Muito Forte	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas geralmente pouco extensas, submetidas a poeiras condutoras e a fumos industriais que originem depósitos condutores particularmente espessos; - Zonas geralmente pouco extensas, muito próximas da costa e sujeitas a ventos fortes e poluentes vindos do mar (menos de 1km); - Zonas desérticas, sem chuva durante longos períodos, expostos a ventos fortes transportando areias e partículas de sal e quando submetidas a uma condensação regular. 	31,0

São também apresentados, pela REN, os níveis de salinidade suportável para cada um dos níveis de poluição.

Tabela 4.7 – Salinidade suportável dos níveis de poluição [12].

Nível de Poluição	Ligeira	Média	Forte	Muito Forte
Salinidade Suportável Expectável (kg/m ³)	≥ 10	≥ 28	≥ 80	≥ 160

Tanto a linha de fuga específica mínima, como os valores da salinidade suportável deverão ser cumpridos.

A escolha do número de isoladores é dada pela divisão do comprimento da linha de fuga necessária, pela linha de fuga do isolador. O número será o valor inteiro, imediatamente a

seguir ao valor obtido. Quando o número de isoladores a utilizar é menor que 10, deverá ser garantido que a deterioração de um dos elementos, não provoca uma redução superior a 10% da linha de fuga, da cadeia. Esse critério é obtido através da restrição $n - 1$ maior que 90%, do cociente entre o comprimento da linha de fuga necessária e o comprimento da linha de fuga do isolador, escolhido. Onde n é o número, inteiro, de isoladores a aplicar [12].

4.5.2. Hastes de Guarda

A utilização deste equipamento, tem como objetivo limitar os efeitos das sobretensões. Através dos elétrodos, quando a sobretensão ultrapassa o nível de proteção, é originado um arco elétrico. É assim, criado um caminho condutor para a terra.

A distância mínima, no ar, entre estes dispositivos é obtida pela REN através das expressões relativas ao contornamento certo ou impossível. Ou seja, 99,4% e 0,6% de probabilidade de contornamento, respetivamente. As expressões, de cálculo, são apresentadas na tabela.

Tabela 4.8 – “Tensões suportáveis convencionais” e tensões de descarga disruptiva “certa” para isolamento autorregenerativo [12].

Solicitação	“Tensão suportável Convencional”	Tensão de descarga disruptiva “certa”
50 Hz	$U_m \times (1 - 5 \times \sigma_{fi})$	-
Impulso Atmosférico	$U_{50a} \times (1 - 2,5 \times \sigma_a)$	$U_{50a} \times (1 + 2,5 \times \sigma_a)$
Impulso de Manobra	$U_{50m} \times (1 - 2,5 \times \sigma_m)$	$U_{50m} \times (1 + 2,5 \times \sigma_m)$

Através das expressões apresentadas, para o impulso atmosférico, em conjunto com as expressões de cálculo para as tensões de descarga dos intervalos de ar, para onda de impulso atmosférico positiva, deduzem-se as expressões utilizadas pela REN.

- **Contornamento Impossível**

$$d = \frac{U_w}{(360 + 150 \times k_+) \times (1 - 2,5 \times \sigma_a)} \quad (4.29)$$

- **Contornamento certo**

$$d = \frac{U_w}{(360 + 150 \times k_+) \times (1 + 2,5 \times \sigma_a)} \quad (4.30)$$

Através das equações, apresentadas, é possível determinar as distâncias mínimas, entre dispositivos de guarda. Considerando um desvio de 6%, obtêm-se os valores da **Tabela 4.9**.

Tabela 4.9 – Distância mínima no ar dos dispositivos de guarda, REN [12].

Tensão mais elevada (kV_{ef})	Tensão suportável ao impulso atmosférico do Painei de linha (kV)	Distância mínima no ar entre dispositivos de guarda (m)			
		Cadeia lateral ($k_+ = 1,5$)		Cadeia central ($k_+ = 1,2$)	
		Contornamento “certo”	Contornamento “impossível”	Contornamento “certo”	Contornamento “impossível”
420	1425	2,12	2,87	2,29	3,10
245	950	1,41	1,91	1,53	2,07
170	750	1,11	1,51	1,21	1,63
72,5	325	0,48	0,65	-	-

De uma forma resumida, a REN, apresenta uma gama de distâncias a utilizar, para cada valor da tensão mais elevada.

Tabela 4.10 – Gama de distâncias entre dispositivos de guarda, REN [12].

Tensão mais elevada (kV)	Distância (m)
420	2,70 a 3,10
245	1,80 a 2,00
170	1,20 a 1,40
72,5	0,40 a 0,55

A REN, apenas considera as sobretensões de origem atmosférica para o cálculo das distâncias mínimas, entre dispositivos. No quadro 17, do guia da REN, são apresentados valores de tensão de contornamento, à onda de manobra positiva, para as distâncias mínimas apresentadas. Verifica-se que esses valores não ultrapassam os valores de sobretensão, apresentados em 4.1.3. Como tal, não é necessário considerar as sobretensões de manobra para o dimensionamento das distâncias, entre hastes de guarda.

O procedimento para chegar aos valores das distâncias entre hastes, através do método da CEI, é o seguinte:

- Para cada valor de tensão máxima, U_m , verificar o valor nominal da tensão suportável ao impulso atmosférico padrão. Consultar **Figura A. 3** e **Figura A. 4**;
- Classe I ($1 < U_m \leq 245kV$) – Para o valor anterior, verificar a menor distância entre o “Rod-structure” e “Conductor-structure”. Consultar **Figura A. 5**;
Classe II ($U_m > 245kV$) – Verificar a maior distância para a configuração “Rod-structure”, para a tensão suportável ao impulso atmosférico, **Figura A. 5**, e para a tensão suportável ao impulso de manobra padrão, **Figura A. 6**.

Seguindo os passos descritos, chegam-se aos valores das distâncias mínimas.

Tabela 4.11 – Gama de distâncias entre dispositivos de guarda, CEI – Classe II.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso de manobra padrão Fase-terra kV – valor de pico	Tensão suportável ao impulso atmosférico padrão kV – valor de pico	Distância mínima m		Gama de distância mínima m
			Rod-structure Impulso de Manobra	Rod-structure Impulso Atmosférico	
420	850	1050	2,40	2,10	2,40 – 3,40
		1175		2,35	
	950	1175	2,90	2,35	
		1300		2,60	
	1050	1300	3,40	2,60	
		1425		2,85	

Tabela 4.12 – Gama de distâncias entre dispositivos de guarda, CEI – Classe I.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso atmosférico padrão kV – valor de pico	Distância mínima m		Gama de valores para distância mínima m
		Rod-structure	Conductor-structure	
245	650	1,30	-	1,30 – 1,90
	750	1,50	-	
	850	1,70	1,60	
	950	1,90	1,70	
	1050	2,10	1,90	
170	550	1,10	-	1,10 – 1,50
	650	1,30	-	
	750	1,50	-	
72,5	325	0,63	-	0,63

Comparando os valores sugeridos, pela CEI e pela REN, verifica-se que para os 72,5kV a REN apresenta distâncias inferiores. Para os 170kV, a REN apresenta o limite mínimo superior ao da CEI, e o limite máximo inferior. Para os 245kV a CEI apresenta, para os dois limites, valores inferiores. Já para 420kV, a REN apresenta o limite mínimo superior ao da CEI, e o limite máximo inferior. Tal acontece, porque a CEI considera também as solicitações de manobra, para tensões superiores a 245kV, resultando sempre em maiores distâncias de isolamento.

Como a REN faz o dimensionamento, das distâncias, com base em apenas o valor máximo, para a tensão suportável do painel de linha, resulta sempre em maiores distâncias mínimas, relativamente à CEI. Há assim, um menor detalhe no cálculo destas distâncias.

Através das distâncias, apresentadas pela REN, é possível estudar a probabilidade de disrupção, dos intervalos. Para tal, ir-se-á proceder ao cálculo da tensão U_{50} , para um impulso atmosférico e verificar qual a probabilidade de disrupção quando submetido ao valor da tensão suportável, do painel de linha.

Tabela 4.13 – Probabilidade de disrupção, dos intervalos de ar, para distâncias mínimas entre hastes – REN.

Tensão mais elevada kV	Tensão suportável ao impulso atmosférico do painel de linha – U kV	Distância entre dispositivos de guarda m	Cadeia lateral ($k_r=1,5$)		Cadeia central ($k_r=1,2$)	
			U50 _a kV	P(U) %	U50 _a kV	P(U) %
420	1425	2,70	1579,50	5,15	1458,00	35,30
		3,10	1813,50	0,02	1674,00	0,66
245	950	1,80	1053,00	5,15	972,00	35,30
		2,00	1170,00	0,09	1080,00	2,24
170	750	1,20	702,00	87,28	648,00	99,56
		1,40	819,00	8,01	756,00	44,74
72,5	325	0,40	234,00	100,00	-	-
		0,55	321,75	56,68	-	-

Verifica-se que para as tensões de 245 e 420kV, a probabilidade de disrupção é praticamente a mesma. Quer isto dizer, que as distâncias para estes dois níveis de tensão, foram obtidas de forma a atingir-se o mesmo desempenho.

Para os 72,5 e 170kV, não se verifica a procura do mesmo nível de desempenho. No entanto, repare-se que a probabilidade de disrupção é muito maior. Este facto significa que o arco, entre as hastes, se irá dar para valores de sobretensão mais baixos, do que os que se verificar-se-iam com uma probabilidade de disrupção inferior. Existe assim uma maior preocupação, com a proteção de equipamentos, para sistemas com tensão mais baixa.

Relativamente ao tipo de cadeia, verifica-se que a probabilidade de disrupção para as cadeias centrais é superior, à das cadeias laterais. Então, para se manter o mesmo nível de desempenho, numa mesma linha, é necessário que as distâncias entre hastes, para cadeias centrais, seja superior às das cadeias laterais.

4.5.3. Distância entre Peças em Tensão e Apoio

É necessário assegurar que para cada apoio, de uma determinada linha, existe um afastamento mínimo entre as peças em tensão, como cadeias de isoladores e condutores. Essa distância, deverá ter em consideração os efeitos do vento, esforços eletrodinâmicos, etc. Ou seja, qualquer tipo de efeito que possa provocar uma aproximação entre as peças em tensão e o apoio.

A REN adota o seguinte critério:

- Sem vento, a distância entre peças e apoio deve garantir uma tensão suportável ao impulso atmosférico 10% acima da cadeia;
- Com vento, a distância entre peças, de uma cadeia desviada pelo vento, e o apoio deve garantir uma tensão suportável, aos 50 Hz, 10% acima da tensão suportável da cadeia sob chuva.

Limita também, as distâncias mínimas às previstas pelo RSLEAT, “Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão”. Posteriormente, ao lançamento do guia, o RSLEAT foi alterado, introduzindo uma nova fórmula para o cálculo destas distâncias. Como tal, a expressão utilizada será a que, atualmente, consta no regulamento.

As expressões recomendadas pela DGEG são:

$$D = 0,10 + 0,0065 \times U , \quad (4.31)$$

para condutores nus, em repouso.

$$D = 0,0065 \times U , \quad (4.32)$$

para condutores nus, desviados pelo vento.

D representa a distância mínima a cumprir, em metros. U é a tensão nominal da linha, em kV.

Com base nessas expressões, obtêm-se as distâncias mínimas para as tensões nominais de 400, 220, 150 e 60kV, para o método da DGEG. A REN, para além desses valores, propõe outras distâncias mínimas.

Tabela 4.14 – Distâncias mínimas entre peças em tensão e apoio, REN.

Tensão Mais Elevada kV	DGEG		REN	
	Condutores em Repouso	Condutores Desviados pelo Vento	Sem Vento	Com Vento
420	2,70	2,60	3,00	2,40
245	1,53	1,43	2,00	1,60
170	1,08	0,98	1,35	1,10
72,5	0,49	0,39	0,55	0,45

O procedimento para chegar aos valores das distâncias entre peças em tensão e apoio, através do método da CEI, é o seguinte:

- Para cada valor de tensão máxima, U_m , verificar o valor nominal da tensão suportável ao impulso atmosférico padrão. Consultar **Figura A. 3** e **Figura A. 4**;
- Classe I ($1 < U_m \leq 245\text{kV}$) – Para o valor anterior, verificar a menor distância entre o “Rod-structure” e “Conductor-structure”. Consultar **Figura A. 5**;
Classe II ($U_m > 245\text{kV}$) – Verificar a maior distância de entre a configuração “Rod-structure”, para a tensão suportável ao impulso atmosférico, **Figura A. 5**, e a configuração “Conductor-structure” para a tensão suportável ao impulso de manobra padrão, **Figura A. 6**.

Seguindo os passos descritos, chegam-se aos valores das distâncias mínimas.

Tabela 4.15 – Gama de distâncias entre condutor e apoio, CEI – Classe II.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso de manobra padrão Fase-terra kV – valor de pico	Tensão suportável ao impulso atmosférico padrão kV – valor de pico	Distância mínima m		Gama de distância mínima m
			Conductor-structure Impulso de Manobra	Rod-structure Impulso Atmosférico	
420	850	1050	1,80	2,10	2,35 – 2,85
		1175		2,35	
	950	1175	2,20	2,35	
		1300		2,60	
	1050	1300	2,60	2,60	
		1425		2,85	

Tabela 4.16 – Gama de distâncias entre condutor e apoio, CEI – Classe I.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso atmosférico padrão kV – valor de pico	Distância mínima m		Gama de valores para distância mínima m
		Rod-structure	Conductor-structure	
245	650	1,30	-	1,30 – 1,90
	750	1,50	-	
	850	1,70	1,60	
	950	1,90	1,70	
	1050	2,10	1,90	
170	550	1,10	-	1,10 – 1,50
	650	1,30	-	
	750	1,50	-	
72,5	325	0,63	-	0,63

Apesar da REN se basear no cálculo recomendado pela DGEG, apresenta distâncias mínimas superiores às das aconselhadas pelo regulamento, sem apresentar qualquer justificação. Em geral, a CEI propõe distâncias mínimas inferiores às da REN. No entanto, os valores da CEI, são também superiores aos da DGEG. Quer isto dizer, que a diminuição das distâncias propostas pela CEI não irão contra às distâncias de segurança regulamentares.

4.5.4. Distância entre Condutores

Este isolamento, fase-fase, deverá ser realizado de forma a garantir que, em regime permanente, não haja possibilidade de disrupção, entre fases, mesmo quando os condutores são deslocados pelo vento. Deverá também assegurar que quando sob solicitações, de frente lenta ou de frente rápida, não há disrupção.

O método de cálculo, da REN, para obtenção destas distâncias é baseado nas recomendações do regulamento. Onde é sugerido a utilização da seguinte expressão:

$$D = k \times \sqrt{f + d} + \frac{U}{150} \quad , \quad (4.33)$$

onde,

f – Flecha máxima dos condutores, em metros;

d – Comprimento da cadeia de isoladores, em metros;

U – Tensão nominal da linha, em kV;

k – Coeficiente dependente da natureza dos condutores (0,6 para condutores de cobre, bronze, aço e alumínio-aço. 0,7 para condutores de alumínio e ligas de alumínio).

O regulamento refere ainda que, fora das zonas de gelo, a distância entre condutores nus poderá ser inferior ao valor obtido pela expressão indicada, anteriormente, desde que a distância entre os planos horizontais, passando pelos respectivos pontos de fixação, não seja menor que dois terços do outro valor. No entanto, para qualquer dos casos, a distância nunca deverá ser inferior a 1cm/kV, com um mínimo de 0,50m.

Através da expressão, considerando $k=0,6$, a REN apresenta as seguintes distâncias mínimas, entre condutores.

Tabela 4.17 – Distâncias mínimas entre condutores, REN.

Tensão Mais Elevada kV	Comprimento da cadeia m	Flecha máxima m	Distância mínima m
420	4,0	29,40	6,13
245	3,0	22,60	4,50
170	2,0	21,36	3,90
72,5	1,0	8	2,20

O procedimento para chegar aos valores das distâncias entre condutores, através do método da CEI, é o seguinte:

- Para cada valor de tensão máxima, U_m , verificar o valor nominal da tensão suportável ao impulso atmosférico padrão. Consultar **Figura A. 3** e **Figura A. 4**;
- Classe I ($1 < U_m \leq 245\text{kV}$) – Para o valor anterior, verificar a distância para o “*Rod-structure*”. Consultar **Figura A. 5**;
Classe II ($U_m > 245\text{kV}$) – Verificar a maior distância de entre a configuração “*Rod-structure*”, para a tensão suportável ao impulso atmosférico, **Figura A. 5**, e a configuração “*Conductor-conductor*” para a tensão suportável ao impulso de manobra padrão, **Figura A. 7**.

Seguindo os passos descritos, chegam-se aos valores das distâncias mínimas.

Tabela 4.18 – Gama de distâncias entre condutores, CEI – Classe II.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso de manobra padrão		Tensão suportável ao impulso atmosférico padrão kV – valor de pico	Distância mínima m		Gama de distância mínima m
	Fase-terra kV – valor de pico	Fase – fase Fase – terra		Conductor-Conductor Impulso de Manobra	Rod-structure Impulso Atmosférico	
420	850	1,60	1050	2,90	2,10	2,90 – 3,60
			1175		2,35	
	950	1,5	1175	3,10	2,35	
			1300		2,60	
	1050	1,5	1300	3,60	2,60	
			1425		2,85	

Tabela 4.19 – Gama de distâncias entre condutores, CEI – Classe I.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso atmosférico padrão kV – valor de pico	Distância mínima m	Gama de valores para distância mínima m
		Rod-structure	
245	650	1,30	1,30 – 2,10
	750	1,50	
	850	1,70	
	950	1,90	
	1050	2,10	
170	550	1,10	1,10 – 1,50
	650	1,30	
	750	1,50	
72,5	325	0,63	0,63

Como se verifica pelas tabelas, as distâncias apresentadas pela CEI são muito inferiores às propostas pela REN. Tal resultado seria de esperar, devido ao excesso dos valores apresentados para o comprimento da cadeia de isoladores, tal como é possível verificar pelo anexo IV do guia, assim como utiliza valores elevados para as flechas máximas. O dimensionamento, ajustado a uma determinada linha aérea, resultará em distâncias muito inferiores.

A REN, refere que caso se verifique a existência de estruturas de apoio entre os condutores, a distância entre eles deverá ser superior ao dobro da distância mínima das peças em tensão-estrutura.

Com a utilização de cadeias em V, é possível diminuir o balanceamento dos condutores, sendo possível diminuir estas distâncias.

4.5.5. Distância entre Condutores e Cabos de Guarda

Mais uma vez, a REN, segue as recomendações do RSLEAT. Onde é definido que a distância mínima entre condutores e cabos de guarda, próximo da fixação dos apoios, não deverá ser inferior à distância entre condutores. No entanto, nos casos onde a flecha dos

cabos de guarda é inferior à dos condutores, a distância poderá ser reduzida. Mas, com o cuidado de se verificar que a distância entre condutores e cabos de guarda, a meio vão e nas condições de flecha mínima, é a calculada anteriormente.

4.6. Análise das Distâncias Mínimas

De forma a validar as distâncias mínimas obtidas, através da CEI, pretende-se agora comparar os resultados, obtidos, com valores recomendados por outra entidade. Como tal, é considerada a normalização EN 50341-3-17 [21].

Os valores apresentados foram selecionados com base nos valores, das sobretensões de impulso atmosférico e de manobra, considerados pela CEI.

São analisadas as distâncias mínimas entre peças em tensão e apoio, assim como as distâncias mínimas entre condutores.

4.6.1. Distância entre Peças em Tensão e Apoio

Tabela 4.20 – Distâncias entre peças em tensão e apoio, EN 50341-3-17 – Classe II.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso de manobra kV	Tensão suportável ao impulso atmosférico kV	Distância mínima m		Gama de distância mínima m
420	950	1175	2,26	2,11	2,34 – 2,60
		1300		2,34	
	1050	1300	2,60	2,34	
		1425		2,56	

Tabela 4.21 – Distâncias entre peças em tensão e apoio, EN 50341-3-17 – Classe I.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso atmosférico kV	Distância mínima m	Gama de distância mínima m
245	850	1,54	1,54 – 1,90
	950	1,72	
	1050	1,90	
170	550	1,01	1,01 – 1,36
	650	1,19	
	750	1,36	
72,5	325	0,61	0,61

Como se verifica, pelas tabelas anteriores, os valores propostos por esta norma são muito parecidos com os apresentados, pela CEI. Como tal, consideram-se válidas as distâncias apresentadas pela Comissão Eletrotécnica Internacional.

A norma EN 50341-3-17, apresenta ainda distâncias mínimas entre peças em tensão e apoio, para os condutores dentro da janela. Sendo as mesmas, apresentadas de seguida.

Tabela 4.22 – Distâncias entre peças em tensão e apoio, condutor-janela, EN 50341-3-17.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Gama de distância mínima m
72,5	0,64
170	1,06 – 1,43
245	1,62 – 2,00
420	2,79 – 3,24

4.6.2. Distâncias entre Condutores

Tabela 4.23 – Distâncias entre condutores, EN 50341-3-17 – Classe II.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso de manobra kV	Tensão suportável ao impulso atmosférico kV	Distância mínima m		Gama de distância mínima m
420	950	1175	2,97	2,45	2,97 – 3,45
		1300		2,71	
	1050	1300	3,45	2,71	
		1425		2,97	

Tabela 4.24 – Distâncias entre condutores, EN 50341-3-17 – Classe I.

Tensão mais elevada para o equipamento (U_m) kV – valor eficaz	Tensão suportável ao impulso atmosférico kV	Distância mínima m	Gama de distância mínima m
245	850	1,79	1,79 – 2,21
	950	2,00	
	1050	2,21	
170	550	1,17	1,17 – 1,58
	650	1,38	
	750	1,58	
72,5	325	0,71	0,61

Devido à similaridade de valores, consideram-se válidas as distâncias apresentadas pela CEI, entre condutores.

4.7. Conclusão

Ao longo deste capítulo, foram apresentadas todas as diferenças entre a metodologia da CEI e da REN, para a realização da coordenação de isolamento.

O facto da norma da CEI ser mais atual que o guia da REN, faz com que haja diferenças consideráveis entre as duas entidades. Pois, de base, poderão ter sido consideradas novas evoluções científicas, com relevância para o estudo da coordenação de isolamento. O estudo,

base, que deu origem à norma da CEI não é detalhado pela mesma. No entanto, as principais considerações tomadas foram apresentadas, ao longo deste capítulo.

Em 4.5, foi verificado que algumas das distâncias mínimas podem ser reduzidas, relativamente às recomendações da REN. A redução dessas distâncias tem um impacto positivo no atravancamento das linhas. Há a possibilidade de reduzir a largura dos apoios e até mesmo, em alguns casos, diminuir a sua altura. Para além da diminuição do esforço económico, uma possível compactação traduz-se num menor impacto visual dos apoios, no meio circundante.

Por fim, verificou-se a validade das distâncias mínimas apuradas. Comparando com a norma EN 50341-3-17, verificou-se uma grande coerência entre as duas normalizações. Concluindo-se assim, que as distâncias da CEI são válidas.

Capítulo 5

Compactação de Linhas Aéreas de Transporte

No capítulo anterior, obtiveram-se as distâncias mínimas de isolamento, propostas pela norma CEI 60071-2, compararam-se as mesmas com as distâncias propostas pela REN e foram validadas, através da comparação das distâncias propostas na norma EN 50341-3-17. Verificou-se que existe margem para diminuir algumas dessas distâncias, tendo impacto positivo no atravancamento das linhas.

Apesar de ser possível diminuir as distâncias, é necessário garantir que essa diminuição não prejudique o desempenho das linhas. Assim como, verificar se existem condições para a execução de trabalhos em tensão.

Tendo em vista as considerações apontadas, este capítulo pretende analisar a possibilidade de compactação das linhas de transporte. Para isso, serão analisadas as distâncias obtidas, no capítulo anterior.

5.1. Apoios Utilizados pela REN

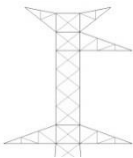
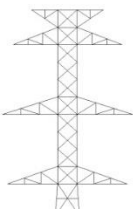
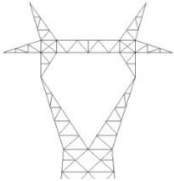
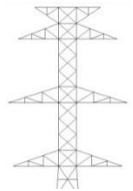
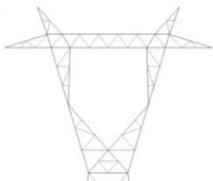
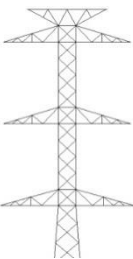
Para tornar este estudo o mais atual possível foi realizada uma consulta com a REN, de forma a perceber quais os tipos de apoios mais utilizados, atualmente, para cada nível de tensão. Através dos desenhos técnicos [15][16][17][18][19], desses apoios, foi possível verificar as distâncias utilizadas, em cada um deles.

É importante referir, que serão estudados todos os níveis de tensão, considerados até agora, com a exceção das linhas com tensão mais elevada de 72,5kV. Os comprimentos das cadeias, considerados, foram baseados nos valores apresentados no guia da REN, anexo IV. Os mesmos, adicionados de uma margem para compensar o comprimento dos acessórios, são expostos na **Tabela 5.1**. Na **Tabela 5.2**, são apresentadas as distâncias, para cada tipo de apoio e nível de tensão, com base nos comprimentos das cadeias, referidos. As distâncias, consideradas, foram obtidas tomando os condutores em repouso.

Tabela 5.1 – Comprimentos das cadeias de isoladores, considerados.

Tensão kV – valor eficaz	Comprimento da cadeia de isoladores m
170	1,90
245	2,50
420	3,50

Tabela 5.2 – Distâncias mínimas dos apoios utilizados pela REN.

Tensão kV – valor eficaz	Apoio		Distância mínima m		
	Esquema	Descrição	Condutor- estrutura	Condutor- condutor	Condutor- cabo de guarda
170		Tipo FS – Suspensão em triângulo (Linha simples)	2,92	5,40	4,57
		Tipo CWS – Suspensão em esteira vertical (Linha dupla)	4,46	6,42	5,87
245		Tipo MT1 – Suspensão em esteira horizontal (Linha simples)	Cadeia central: 3,60 Cadeia lateral: 3,25	7,00	6,96
		Tipo CWS – Suspensão em esteira vertical (Linha dupla)	4,41	6,42	6,40
420		Tipo QS – Suspensão em esteira horizontal (Linha simples)	Cadeia central: 3,80 Cadeia lateral: 5,50	10,00	8,10
		Tipo DLS – Suspensão em esteira vertical (Linha dupla)	5,50	8,25	7,20

5.2. Trabalhos em Tensão

Em linhas aéreas, existe a necessidade de executar trabalhos de manutenção ou até de reparação. Quando, devido à continuidade de serviço, é necessário que esses trabalhos sejam realizados em tensão, tem-se de garantir condições de segurança aos executantes dos trabalhos. A intervenção deverá ser previamente estudada, de forma a ajustar a técnica ao serviço concreto. Os técnicos, deverão ser profissionais altamente qualificados para este tipo de operações.

As técnicas mais utilizadas são as seguintes:

- “*Hot-stick*” – O trabalhador realiza os trabalhos à distância, através de uma vara isolante. Nesta técnica, deverão ser definidas distâncias mínimas de aproximação [22].
- “*Bare hand*” – Usando um fato condutor, o técnico é deslocado para o local específico da intervenção, através de uma escada isolante. Como é colocado ao mesmo potencial da fase, deverá manter-se afastado das estruturas de potencial diferente [22].

As distâncias de segurança, para a execução destes trabalhos, não têm definição normativa. Devendo a técnica ser ajustada a cada trabalho, através do estudo das condições do local. Ou seja, deverão ser analisadas as características da linha e definidos os locais, no apoio, por onde poderá haver passagem de pessoas e materiais.

De forma a garantir que os técnicos têm margem de manobra, decidiu-se definir um perímetro de segurança. Esse perímetro, é definido com base numa tensão elevada afetada por um fator de segurança e um fator de correção atmosférico. Através dessa tensão, é verificada a distância mínima para a configuração do respetivo intervalo de ar.

Para a classe I, a distância será a correspondente à maior tensão suportável, ao impulso atmosférico. Para a classe II, será a maior das distâncias verificadas para a maior tensão suportável de impulso de manobra e impulso atmosférico.

A tensão suportável considerada, corresponde ao valor com 10% de probabilidade de irromper o intervalo. Através das equações (4.4), (4.7) e (4.8) é possível relacionar a tensão U_{10} e a tensão com 50% de probabilidade de disrupção, U_{50} :

$$U_{50} = \frac{U_{10}}{(1 - 1,3 \times 0,03)} \quad (5.1)$$

$$U_{50} = \frac{U_{10}}{(1 - 1,3 \times 0,06)} \quad (5.2)$$

A equação (5.1) aplica-se para sobretensões de origem atmosférica e a (5.2) para sobretensões de manobra.

O valor da tensão U_{10} , será majorado por dois fatores. O primeiro, corresponde ao fator de segurança, definido em 4.4.2. O segundo fator, deverá efetuar a correção de altitude, definido em 4.4.1.

Como o isolamento de linhas aéreas é externo, o fator de segurança adotado é:

$$k_s = 1,05$$

A correção de altitude é descrita através da seguinte expressão:

$$k_a = e^{m \left(\frac{H}{8150} \right)}, \quad (5.3)$$

onde

H – Altitude, acima do nível do mar (metros).

$m = 1$ para tensões suportáveis, a impulso atmosférico.

m de acordo com a **Figura A. 2** para tensões suportáveis, de impulso de manobra.

Em Portugal Continental, cerca de 88% do território encontra-se abaixo dos 700 metros de altitude [23]. Justifica-se assim a utilização desse valor.

Para a sobretensão atmosférica obtém-se a distância mínima, através da dedução das equações (4.18), (4.19) e (5.1):

$$d = \frac{U_{10} \times k_s \times k_a}{530 \times (0,74 + 0,26 \times K) \times (1 - 1,3 \times 0,03)} \quad (5.4)$$

Através da dedução das equações (4.12), (4.14) e (5.2) obtém a expressão que descreve a distância mínima, para sobretensão de manobra:

$$d = \frac{e^{\frac{U_{10} \times k_s \times k_a}{1080 \times K \times (1 - 1,3 \times 0,06)}} - 1}{0,46} \quad (5.5)$$

K traduz a configuração do intervalo de ar. São considerados duas configurações, condutor-apoio e condutor-janela, descritos por um fator de intervalo de 1,45 e 1,25 respetivamente.

Com base na formulação apresentada, obtém-se as distâncias a garantir para execução de trabalhos em tensão. Apresenta-se, de seguida, uma tabela com esses valores.

Tabela 5.3 – Distâncias mínimas para executar trabalhos em tensão.

Tensão kV – valor eficaz	Tensão suportável a impulso atmosférico kV – valor de pico	Tensão suportável a impulso de manobra kV – valor de pico	Distância mínima m	
			Condutor-Apoio	Condutor-Janela
170	750	-	1,51	1,58
245	1050	-	2,11	2,21
420	1425	1050	2,87	3,39

5.3. Proposta de Compactação

A CEI, não refere as distâncias mínimas, entre apoio e condutor, com incidência de vento. Como tal, assume-se que deverão ser garantidas as distâncias mínimas, para a tensão suportável mais baixa, com os condutores deslocados pelo vento. Com os condutores em repouso, assumem-se os valores mais elevados, das distâncias mínimas, referentes às tensões suportáveis superiores. Tem-se a consciência que, em alguns casos, a DGEG permite uma distância menor. No entanto, como o objetivo é verificar as consequências da aplicação das distâncias da CEI, serão utilizadas as recomendações dessa entidade.

Para os condutores dentro da janela, serão consideradas as distâncias mínimas apontadas em 4.6.1, uma vez que a CEI não refere essa situação.

Para a verificação da distância entre apoio e condutor, com incidência de vento, foi considerado um ângulo, de desvio transversal da cadeia, de 40 graus.

As estruturas de suporte, dos cabos de guarda, são alteradas tendo em consideração que os pontos de fixação, dos condutores, deverão ficar dentro de um ângulo de 20 graus com o vértice no ponto de fixação do cabo de guarda e a bissetriz vertical, do apoio [20].

Em nenhum dos casos, é alterada a largura da estrutura vertical dos apoios. Assim como, são mantidas as alturas dos apoios, até ao braço de suporte mais baixo.

5.3.1. Linhas com Tensão Nominal de 150 kV

Os apoios mais utilizados, para este nível de tensão nominal, são os já referidos. Apoio do tipo FS, com suspensão em triângulo, para linhas simples e do tipo CWS, suspensão em esteira vertical, para linhas duplas. Nos anexos, A3.1 e A3.2, é possível verificar as dimensões detalhadas, dos mesmos.

Apoio Tipo FS

Para os condutores em repouso, as distâncias que se verificam nos apoios e as distâncias recomendadas, são comparadas nas seguintes figuras.

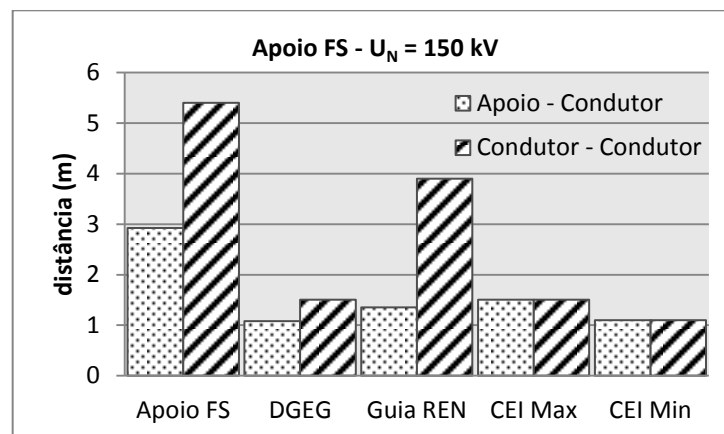


Figura 5.1 – Comparação das distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio FS, $U_N=150$ kV.

As distâncias no apoio, são consideravelmente superiores às distâncias propostas pelas várias entidades.

A distância condutor-condutor, apresentada para a DGEG, toma em consideração a permissão de redução da distância mínima entre condutores para 1cm/kV, fora das zonas de gelo. Mais uma vez se verifica, uma grande diferença nas distâncias utilizadas pela REN e as recomendadas pelas outras entidades.

Com base nas comparações, anteriores, propõe-se a seguinte compactação do apoio FS, aplicado para o nível de tensão de 150kV.

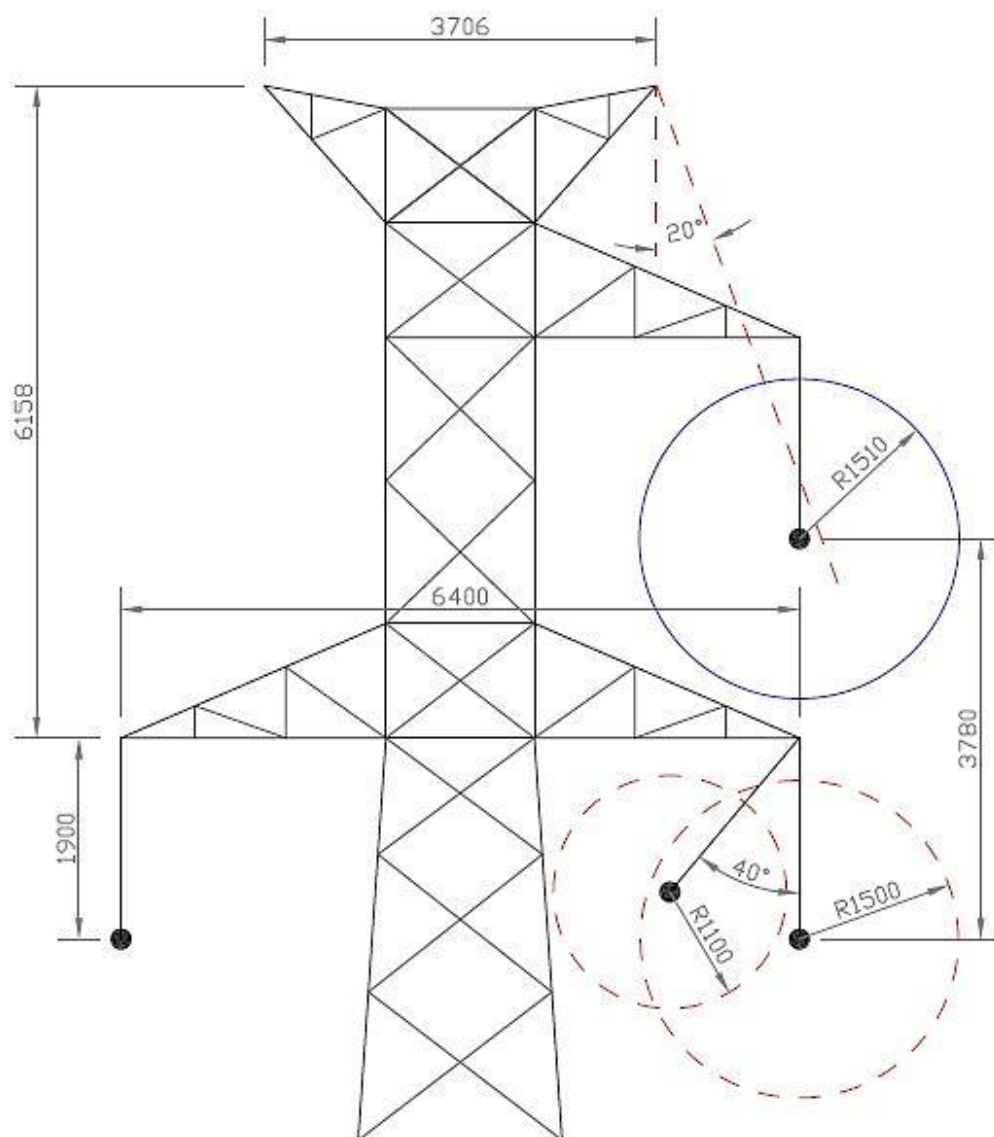


Figura 5.2 – Proposta de compactação do apoio FS, $U_N=150\text{kV}$, em milímetros.

Como se verifica, pela circunferência com raio de 1510mm, foram garantidas as distâncias mínimas para execução de trabalhos em tensão.

Esta proposta, permite uma redução da largura do apoio em cerca de 14.7% e da altura, entre suporte de cabo de guarda e suporte inferior, em 22.0%. Também a largura da estrutura, de suporte dos cabos de guarda, foi reduzida em cerca de 25.9%.

Apoio Tipo CWS

As distâncias que se verificam nos apoios e as distâncias recomendadas, são comparadas de seguida.

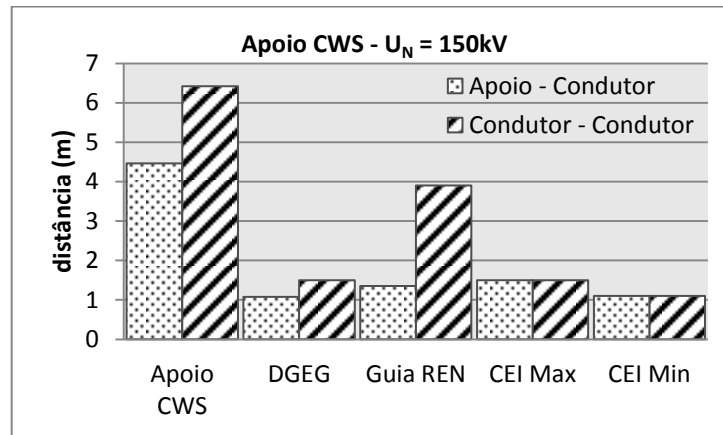


Figura 5.3 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio CWS, $U_N=150\text{kV}$.

Mais uma vez, se verifica que as distâncias mínimas, utilizadas nos apoios, são bastante superiores às distâncias propostas pelas várias entidades.

Propõe-se assim, a seguinte compactação do apoio CWS.

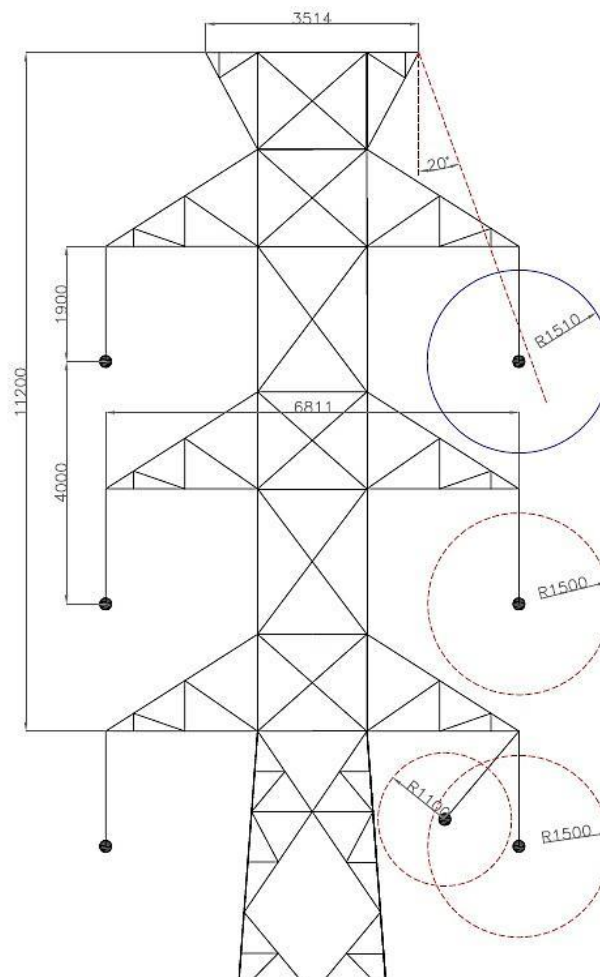


Figura 5.4 – Proposta de compactação do apoio CWS, $U_N=150\text{kV}$, em milímetros.

Esta proposta permite uma redução da largura, do apoio, em cerca de 43.2% e da altura, entre suporte de cabo de guarda e suporte inferior, em 30.0%. Também a largura, da estrutura de suporte dos cabos de guarda, foi reduzida em cerca de 46.7%.

5.3.2. Linhas com Tensão Nominal de 220 kV

Para este nível de tensão nominal, a REN utiliza o apoio tipo MT1 com suspensão em esteira horizontal, para linhas simples. Para linhas duplas, recorre ao apoio do tipo CWS com suspensão em esteira vertical. Nos anexos, A3.2 e A3.3, é possível verificar as dimensões detalhadas, dos mesmos.

Apoio Tipo MT1

Para os condutores em repouso, as distâncias que se verificam nos apoios e as distâncias recomendadas são comparadas nas seguintes figuras.

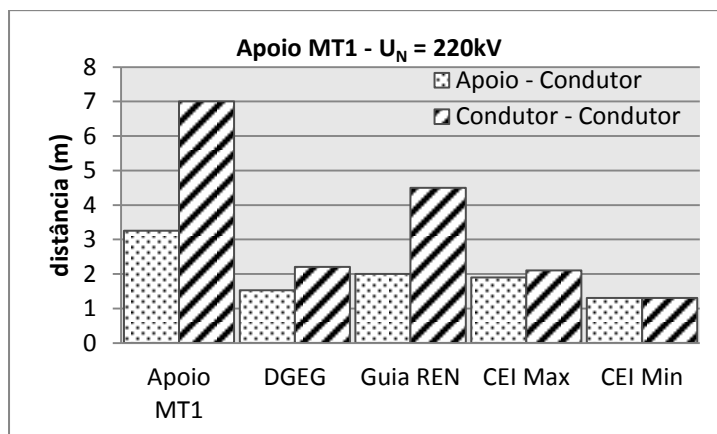


Figura 5.5 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio MT1, U_N=220kV.

Também no apoio MT1, verifica-se que as distâncias são consideravelmente superiores às propostas pelas várias entidades.

A distância apresentada para a DGEG, toma em consideração a permissão de redução da distância mínima entre condutores para 1cm/kV, fora das zonas de gelo.

Com base na informação, anterior, propõe-se a seguinte compactação do apoio MT1, aplicado para o nível de tensão de 220kV.

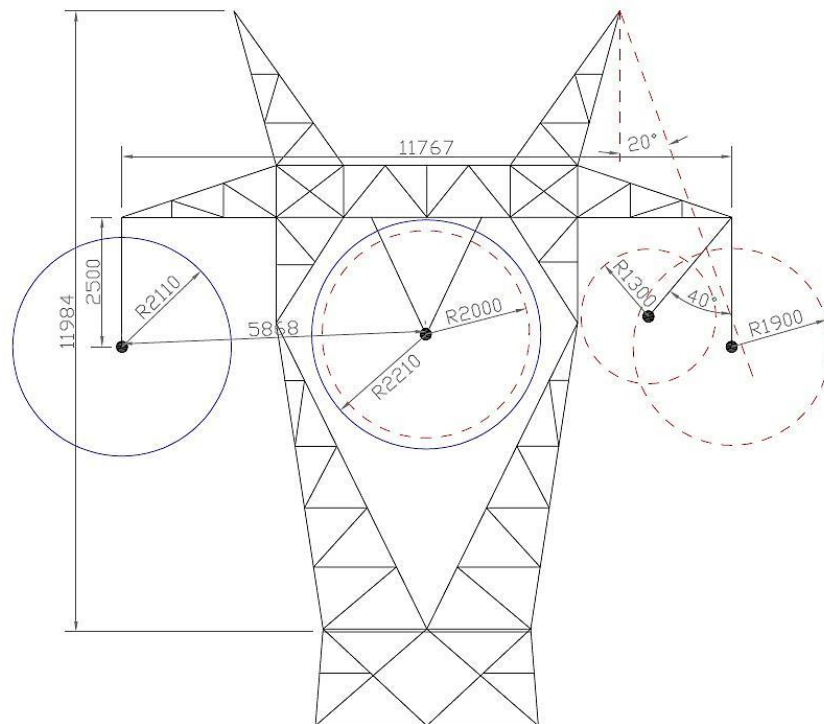


Figura 5.6 – Proposta de compactação do apoio MT1, $U_N=220\text{kV}$, em milímetros.

Também aqui, foram garantidas as distâncias mínimas para realização de trabalhos em tensão. Esta proposta, permite uma redução da largura do apoio em cerca de 16.0%. No entanto a redução da altura, entre suporte de cabo de guarda e suporte inferior, é de apenas 1.0%. Esse valor é baixo, devido à imposição de não diminuir a distância dos condutores, mais baixos, ao solo. Como tal, a redução alcançada deve-se apenas à alteração da estrutura de suporte dos cabos de guarda.

Apoio Tipo CWS

As distâncias que se verificam nos apoios e as distâncias recomendadas, são comparadas de seguida.

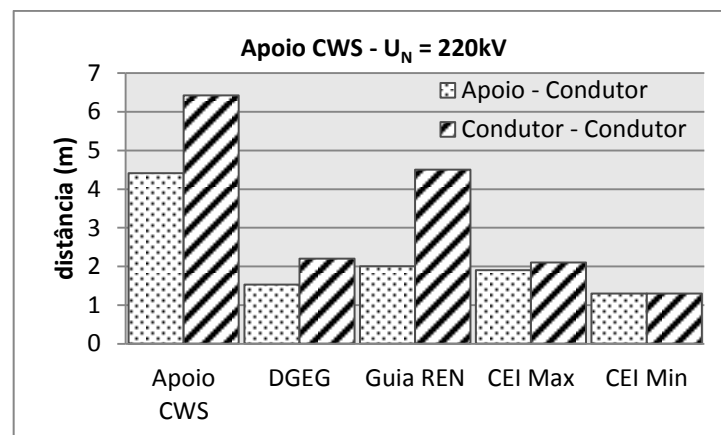


Figura 5.7 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio CWS, $U_N=220\text{kV}$.

Mesmo para os 220kV as distâncias verificadas, neste apoio, são bastante superiores às distâncias propostas pelas várias entidades.

Propõe-se, assim, a seguinte compactação do apoio CWS, para os 220kV.

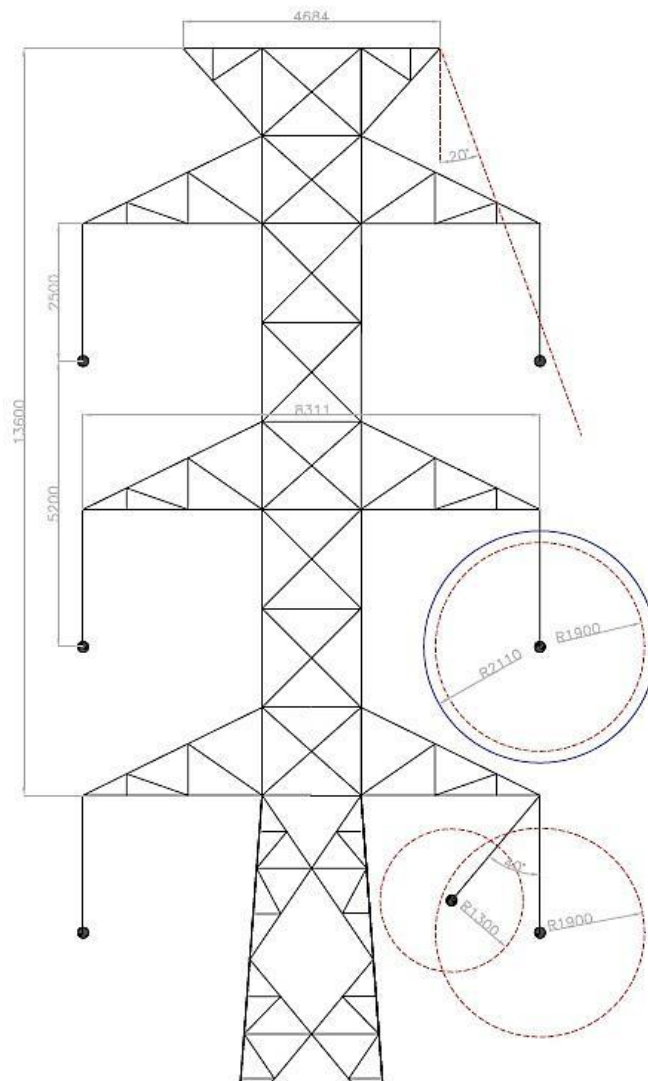


Figura 5.8 – Proposta de compactação do apoio CWS, $U_N=220\text{kV}$, em milímetros.

Esta proposta, permite uma redução da largura do apoio em cerca de 30.7% e da altura, entre suporte de cabo de guarda e suporte inferior, em 15.0%. Também a largura da estrutura de suporte, dos cabos de guarda, foi reduzida em cerca de 29.0%.

Os trabalhos em tensão, também foram assegurados na proposta apresentada.

5.3.3. Linhas com Tensão Nominal de 400 kV

A REN, utiliza o apoio tipo QS com suspensão em esteira horizontal, para linhas simples. Para linhas duplas, recorre ao apoio do tipo DLS com suspensão em esteira vertical. Nos anexos, A3.4 e A3.5, é possível verificar as dimensões detalhadas, dos mesmos.

Apoio Tipo QS

Para os condutores em repouso, as distâncias que se verificam nos apoios e as distâncias recomendadas, são comparadas nas seguintes figuras.

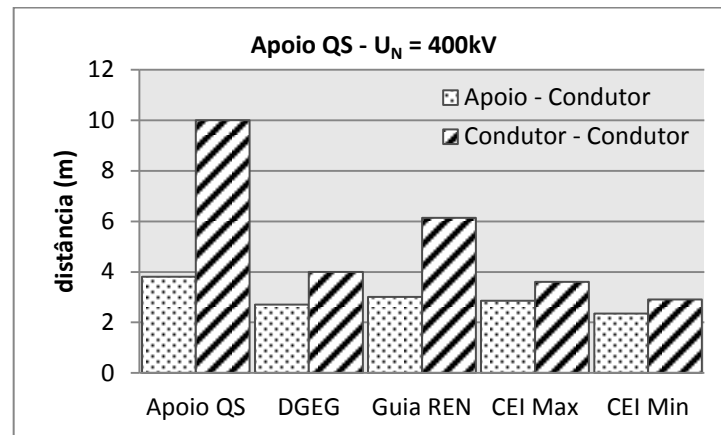


Figura 5.9 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio QS, $U_N=400\text{kV}$.

Para este apoio, verifica-se que apesar de não tão considerável como para outros, a distância apoio-condutor é superior às propostas pelas várias entidades. Já para a distância entre condutores, a diferença é mais acentuada.

A distância apresentada, para a DGEG, toma em consideração a permissão de redução da distância mínima entre condutores para 1cm/kV , fora das zonas de gelo.

Com base na informação, anterior, propõe-se a seguinte compactação do apoio QS, aplicado no nível de tensão de 400kV .

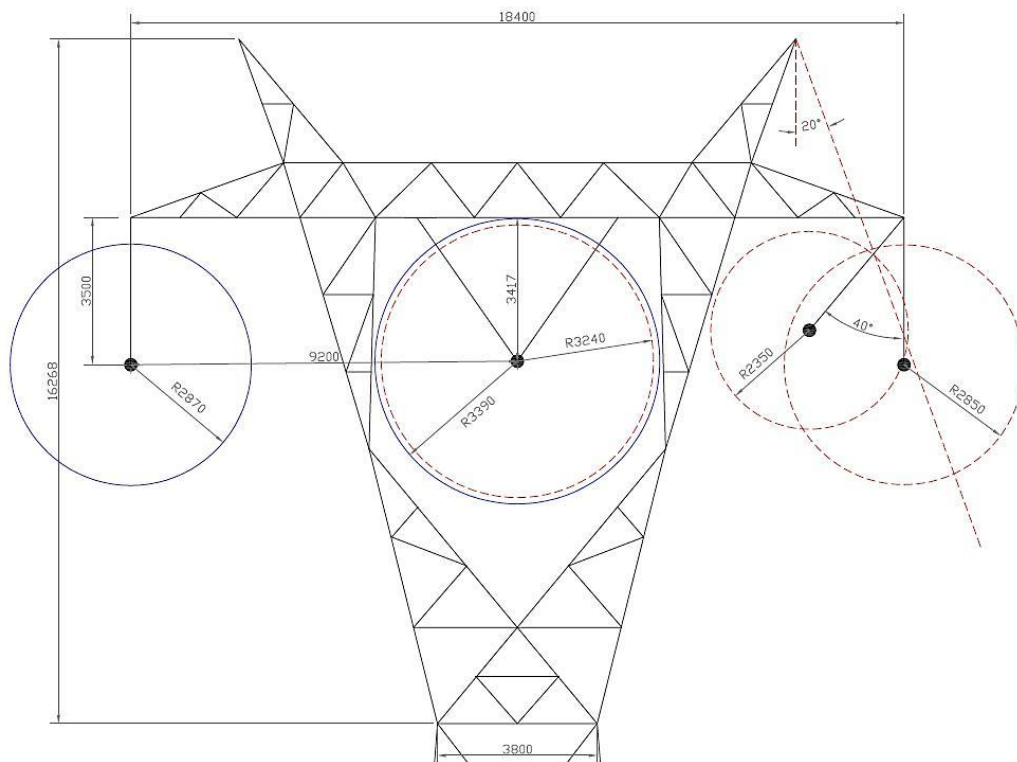


Figura 5.10 – Proposta de compactação do apoio QS, $U_N=400\text{kV}$, em milímetros.

Esta proposta, permite uma redução da largura do apoio em cerca de 8.0%. No entanto, a altura entre suporte de cabo de guarda e suporte inferior é aumentada em 1.8%. Esse efeito, deve-se ao requisito, imposto, para o ângulo de cobertura do cabo de guarda. De forma a manter os 20°, foi necessário alterar a altura da estrutura do cabo de guarda.

Devido a todos os requisitos impostos, tais como trabalhos em tensão e deslocação dos condutores pelo vento, não foi possível obter resultados significativos na compactação deste apoio.

Apoio Tipo DLS

Para os condutores em repouso, as distâncias que se verificam nos apoios e as distâncias recomendadas, são comparadas nas seguintes figuras.

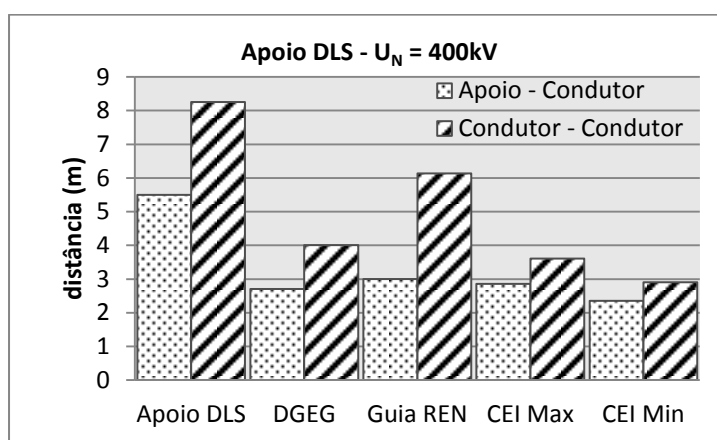


Figura 5.11 – Comparação de distâncias apoio-condutor e condutor-condutor para o apoio DLS, $U_N=400\text{kV}$.

Também para o apoio DLS, verifica-se que as distâncias são consideravelmente superiores às propostas pelas várias entidades.

Propõe-se, assim, a seguinte compactação do apoio DLS.

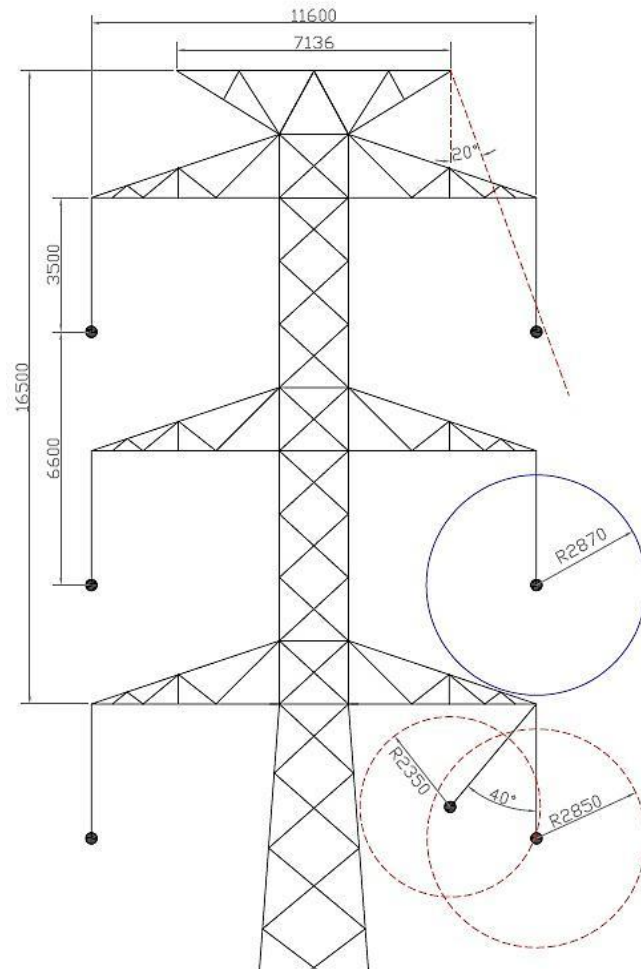


Figura 5.12 – Proposta de compactação do apoio DLS, $U_N=400\text{kV}$, em milímetros.

Como se verifica, pela circunferência de raio 2870mm, foram asseguradas as distâncias mínimas para execução de trabalhos em tensão. Esta proposta, permite uma redução da largura em cerca de 13.4% e da altura, entre suporte de cabo de guarda e suporte inferior, de 16.7%. Permite também uma diminuição da largura da estrutura, de suporte dos cabos de guarda, em cerca de 11.9%.

5.4. Análise do Desempenho face a Descargas Atmosféricas

De forma a garantir que as configurações propostas não comprometem o desempenho das linhas, face a descargas atmosféricas, compara-se o comportamento dos apoios na configuração compacta, com a configuração base.

Os valores obtidos, foram baseados nas distâncias dos apoios para a posição dos condutores e cabos de guarda. Foi considerado um vão de 350 metros, flecha de 11,5 para os condutores e 10,2 metros para os cabos de guarda, correspondentes a um parâmetro da catenária de 1334 e 1504, respetivamente [20]. Através desses dados, é possível obter os resultados, apresentados de seguida, recorrendo ao programa *IEEE Flash v2.01*.

Tabela 5.4 – Desempenho face a descargas atmosféricas.

Tensão nominal kV	Apoio	Configuração	Contornamento inverso /100Km/ano	Falha de escudo /100Km/ano	Total /100Km/ano
150	FS	Base	11,75	0,34	12,09
		Compacto	10,14	0,42	10,56
	CWS	Base	15,09	0,77	15,86
		Compacto	12,00	0,28	12,28
220	MT1	Base	5,01	2,18	7,19
		Compacto	4,14	3,00	7,14
	CWS	Base	7,83	0,85	8,68
		Compacto	6,99	0,67	7,66
400	QS	Base	2,21	4,78	6,99
		Compacto	2,14	2,88	5,02
	DLS	Base	4,40	3,93	8,33
		Compacto	3,79	3,50	7,29

As alturas consideradas, desde o solo até ao braço do condutor mais baixo, foram:

- FS – 34,0 metros;
- CWS – 22,6 metros;
- MT1 – 43,0 metros;
- QS – 40,1 metros;
- DLS – 30 metros.

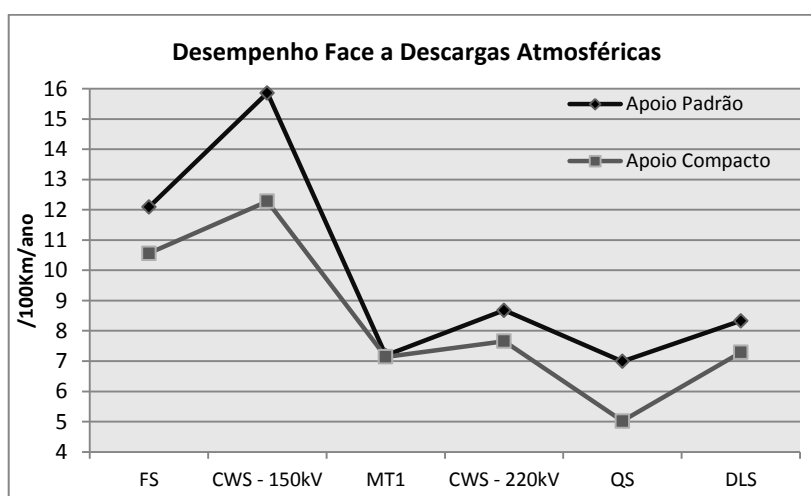


Figura 5.13 – Comparação do desempenho face a descargas atmosféricas, entre apoio base e apoio compacto.

Tal como se verifica, a utilização dos apoios compactos não compromete o desempenho das linhas. Com a exceção do apoio MT1, onde a diferença é insignificante, foram diminuídos o número de defeitos face a descargas atmosféricas.

5.5. Conclusão

As distâncias obtidas, na configuração condutor-apoio, para a realização dos trabalhos em tensão, são muito aproximadas com as distâncias mínimas de isolamento, apresentadas pela CEI. No entanto, para a configuração condutor-janela, as distâncias para realização dos trabalhos apresentam uma limitação na compactação, uma vez que diferem bastante das distâncias mínimas de isolamento. Apesar de adotadas as distâncias mínimas propostas pela EN 50341, para a configuração condutor-janela, foi necessário aumentar a largura dos apoios para cumprir as distâncias para realização dos trabalhos.

Nas propostas, de compactação dos apoios, verificou-se que em alguns casos é possível alcançar reduções mais significativas, do que em outros. As maiores reduções, verificaram-se nos apoios utilizados em linhas duplas. Foi também possível reduzir a altura, das estruturas. O apoio, onde foi possível obter reduções mais significativas foi o tipo CWS. Como é utilizado para as tensões nominais de 150 e 220kV, está fortemente dimensionado para o nível de tensão inferior, registrando-se aí a maior compactação.

Ao longo do estudo, verificou-se que a largura dos apoios depende fortemente da deslocação dos condutores, por influência do vento. Já a altura, é ditada pelas distâncias mínimas com os condutores em repouso. Cumprindo estas duas distâncias, verificou-se que as distâncias entre condutores são asseguradas.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Esta dissertação, pode ser resumida em três grandes fases. A primeira, consiste no apanhado de informação relativa ao tema. A segunda fase, corresponde à comparação de métodos para a realização da coordenação de isolamento. A terceira e última, consiste na aplicação da informação apurada, na segunda fase, e verificação de resultados.

Na primeira fase, correspondente ao capítulo 2, foi reunida informação generalizada acerca da coordenação de isolamento. Foi introduzida a sua filosofia, avaliaram-se os fatores que influenciam o isolamento, analisou-se o método convencional e estatístico, resumiram-se os equipamentos utilizados e descreveu-se a forma como a coordenação de isolamento é realizada. Este capítulo introdutório, desde logo, chama a atenção para a importância da coordenação de isolamento. A mesma, deverá ser realizada de forma a proteger os equipamentos, de uma rede, das solicitações às quais está exposta. No entanto, deverá também ter em conta o esforço económico resultante, de forma a equilibrar a robustez do isolamento e o esforço económico, da sua realização.

A segunda fase, correspondente aos capítulos 3 e 4, compara diferentes metodologias para a realização da coordenação de isolamento. No capítulo 3, comparam-se normas internacionais, respeitantes à CEI e IEEE. No capítulo 4, compara-se a visão nacional, através do guia de coordenação de isolamento da REN, com a norma CEI 60071-2.

A CEI e o IEEE, seguem etapas diferentes no estudo de coordenação de isolamento. No entanto, a metodologia base é muito parecida. Ambos, consideram as mesmas ameaças às quais o sistema está sujeito. Apesar de determinarem as tensões suportáveis de forma diferente, consideram fatores de segurança similares. Por fim, ambas definem o nível de isolamento padrão, com base na tensão máxima do sistema.

No capítulo 4, foi realizado um estudo mais detalhado do processo de coordenação de isolamento, tendo como base a norma da CEI e o guia da REN. Inicialmente, foram estudadas as solicitações dielétricas, consideradas pelos documentos. Verificou-se que devido ao

intervalo temporal, entre os documentos, existem diferenças nas solicitações consideradas. A CEI, dá o nome de sobretensão de frente rápida e de frente lenta, às sobretensões atmosféricas e de manobra, respetivamente. Essa diferença, deve-se ao facto da CEI considerar uma nova classe de sobretensões, chamada de sobretensão de frente muito rápida. Para além dessas diferenças, ambas as entidades, descrevem as solicitações de forma similar.

Na análise da probabilidade de descarga disruptiva, do isolamento, verificou-se que as funções de distribuição, adotadas pelas entidades, são diferentes. A CEI, recorre a uma função de distribuição de Weibull, enquanto a REN utiliza uma distribuição de Gauss. Apesar de apresentarem valores aproximados, a função de Weibull mostra-se mais vantajosa pois permite uma maior facilidade de cálculo, assim como considera na sua definição matemática, os valores de truncatura.

Verificou-se que as formulações matemáticas para o cálculo das tensões de descarga, dos intervalos de ar, são diferentes. Sendo que, a formulação da CEI demonstrou-se mais vantajosa, do ponto de vista da suportabilidade do ar. Ou seja, para o mesmo intervalo de ar, a CEI apresenta uma tensão de disrupção maior que a tensão proposta pela REN. Com base nesta informação, seria de esperar que as distâncias de isolamento propostas pela CEI fossem inferiores às da REN.

Na análise das distâncias no ar, para o isolamento dos condutores, verificou-se que o método de as obter difere para os dois documentos. Na CEI, são calculadas as tensões suportáveis afetadas por fatores de correção, sendo de seguida normalizadas com base na tensão mais elevada do sistema. Através dessas tensões, é possível consultar todas as distâncias necessárias. Já a REN, realiza o cálculo para cada um dos tipos de distâncias, no ar.

O comprimento da cadeia de isoladores, depende do comprimento da linha de fugas necessária. Essa linha de fuga, está ligada diretamente com o nível de poluição do local. Neste aspeto, as duas entidades, estão em sintonia. Sendo os níveis de poluição e a devida linha de fuga, definidos da mesma forma e com o mesmo valor.

A REN, obtém as distâncias entre dispositivos de guarda, com base em apenas as sobretensões de origem atmosférica. A CEI, considera adicionalmente, para tensões superiores a 245kV, as sobretensões de manobra. Estas diferenças, fazem com que as distâncias recomendadas sejam também diferentes. No entanto, apesar de diferentes, são muito aproximadas. O facto da REN considerar apenas o valor máximo da tensão suportável, do painel de linha, faz com que haja um menor detalhe na obtenção destas distâncias.

Na análise das distâncias, entre peças em tensão e apoio, verificou-se que apesar da REN se basear nas recomendações da DGEG, apresenta sempre distâncias superiores às propostas por essa entidade. Apesar disso, para os 170kV e 72.5kV, a CEI apresenta a possibilidade, de em alguns casos, ser necessário recorrer a distâncias mínimas ainda maiores. Podendo isto querer dizer, que as distâncias mínimas regulamentares são insuficientes, em alguns casos.

Mais uma vez, para as distâncias entre condutores, a REN baseia-se na regulamentação da DGEG. No entanto, as distâncias apresentadas são excessivas. Pois, são baseadas em valores elevados, para os comprimentos das cadeias e das flechas máximas. Como tal, são muito superiores às distâncias propostas pela CEI. A DGEG, permite uma redução das distâncias até 1cm/kV. Traduzindo-se em distâncias de 0.60, 1.50, 2.20 e 4.00 metros, para as tensões nominais de 60, 150, 220 e 400kV, respetivamente. Considerando os valores superiores da tensão suportável, verifica-se que para os 220 e 400kV a CEI permite distâncias abaixo das regulamentares. Tornando-se assim, numa limitação da compactação das linhas. No entanto, os valores apresentados pela CEI vão de encontro aos recomendados pela norma EN 50341-3-17, suportando a sua validade.

Na terceira e última fase, foram propostas compactações dos apoios mais utilizados pela REN. Consideraram-se apoios para linhas simples e duplas, para as tensões nominais de 150, 220 e 400kV. Verificou-se que as distâncias utilizadas nos apoios são muito superiores às recomendadas por qualquer entidade, até mesmo pelo guia da REN.

Foi possível diminuir as dimensões de todos os apoios, considerados. Tendo-se alcançado a maior compactação no apoio tipo CWS, para a tensão nominal de 150kV. Onde se reduziu a largura nuns expressivos 43% e a altura, entre suportes de cabos de guarda e suporte de condutor inferior, em 30%.

Verificou-se que a largura dos apoios depende fortemente da deslocação dos condutores, por influência do vento. Enquanto a altura, nos apoios de linha dupla, é ditada pela distância mínima com os condutores em repouso. Quando essas duas condições são cumpridas, verificou-se que as distâncias mínimas entre condutores são asseguradas.

As principais limitações sentidas, foram as imposições colocadas para verificação de distâncias mínimas, com os condutores deslocados pelo vento, assim como as distâncias mínimas para realização de trabalhos em tensão, para apoios com janela.

Consideram-se cumpridos os objetivos deste trabalho, uma vez que foi possível diminuir a largura de todos os apoios e consequentemente o atravancamento das linhas. Apesar dessa redução, manteve-se a possibilidade de execução dos trabalhos em tensão e até se melhorou o desempenho das linhas, face a descargas atmosféricas.

6.2. Trabalhos Futuros

Existe uma enorme variedade de estudos a serem realizados, acerca deste tema. Uma possibilidade de estudo será, pegando nas compactações obtidas, analisar em detalhe a resposta das linhas às variadas sobretensões. Outro estudo, seria aplicar o conceito de compactação nas subestações convencionais. No entanto, os objetivos deverão ser ponderados, pois cada vez mais se recorrem a subestações isoladas a gás. Apresentando, estas, dimensões bastante reduzidas.

Fugindo desta dissertação, mas mantendo-se dentro do tema, seria interessante estudar a aplicação de descarregadores de sobretensões, em linhas aéreas. Otimizando o local de instalação, dos mesmos, de forma a melhorar o desempenho.

Nos contactos com a REN, percebeu-se que existem algumas linhas com bastantes problemas de desempenho, face a descarga atmosféricas. A elaboração de uma proposta de alteração de uma dessas linhas, de forma a melhorar o seu desempenho, seria uma ótima opção.

Outro trabalho, seria a recolha e análise de informação relativa ao desempenho exigido na Europa, para as linhas, face às várias sobretensões. Ou seja, comparar as exigências existentes em outros países com as nacionais. Nesse estudo, deverão também ser analisados os métodos adotados para alcançar esses níveis de desempenho.

Referências

- [1] Machado e Moura, "TAT Texto Geral", Apontamentos Teóricos de Técnicas de Alta Tensão, FEUP, 2010.
- [2] Helder Leite, "Coordenação de Isolamento", Apresentação Teórica de Técnicas de Alta Tensão, FEUP, 2009.
- [3] José Rui Ferreira, "Linhas de Transmissão", Apontamentos Teóricos de Sistemas Eléctricos de Energia, FEUP, 2004.
- [4] André Filipe Aleixo Moreira, "A Coordenação de isolamento nas linhas aéreas de distribuição e a melhoria da qualidade de serviço", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [5] IEC, "*Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*", IEC 60071-1, Edição 8.0, 2006.
- [6] IEC, "*Amendment 1*", "*Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*", IEC 60071-1, Edição 8.0, 2010.
- [7] IEC, "*Insulation co-ordination – Part 2: Application Guide*", IEC 60071-2, 3ª Edição, 1996.
- [8] IEEE, "*IEEE Standard for Power Systems – Insulation Coordination*", IEEE Std 1313, 1993.
- [9] IEEE, "*IEEE Standard for Insulation Coordination – Definitions, Principles, and Rules*", IEEE Std C62.82.1, 2010.
- [10] IEEE, "*IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination*", IEEE Std 1313.2, 1999.
- [11] IEEE, "*IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing*", IEEE Std 4, 1995.
- [12] REN (ex-EDP), "Guia de Coordenação de Isolamento para a Rede PTI", 1985.
- [13] Cláudio Mardegan, "Capítulo II: Transformadores de Corrente, potencial e bobinas de Rogowski para fins de proteção – parte II", O Setor Eléctrico, Fevereiro de 2010.
- [14] DGEG, "Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão", Lisboa, Abril de 1993.
- [15] Alcide, "Esquema de Montagem – Poste CWS", Desenho Técnico, REN, 10 de Julho de 2000.
- [16] A. Teixeira, "Linhas a 400kV – Poste Tipo DLS3", Desenho Técnico, REN, 25 de Fevereiro de 2000.

- [17] Alcide Silva, “Linha Trifásica Simples a 150 kV – Apoio Tipo FS”, Desenho Técnico, REN, 20 de Julho de 2004.
- [18] José Tavares, “Linhas a 220 kV – Postes Tipo MT1”, Desenho Técnico, REN, 10 de Março de 2004.
- [19] A. Teixeira, “Linhas a 400 kV – Apoio Tipo QS”, Desenho Técnico, REN, 01 de Outubro de 2006.
- [20] Nuno João Falcão Sequeira, “Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a Norma EN50341-1”, Relatório de Projeto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 29 de Junho de 2009.
- [21] Comité Nacional Português (CN), “Aspectos Normativos Nacionais (ANN) para Portugal referentes à EN 50341-1:2001”, EN 50341-3-17, 2001.
- [22] Miguel Carlos Valentim do Rosário, “Coordenação de isolamento em linhas aéreas”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Maio de 2011.
- [23] António Miguel Pereira Jorge Ferreira, “Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional”, Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2000.

Anexos

Anexo 1: Norma CEI 60071-1

A1.1 Classes e Formas de Onda Padrão para Tensões e Sobretensões

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \text{ }\mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 }\mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \text{ }\mu\text{s} < T_1 \leq 20 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ }\mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes	 $f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 }\mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ }\mu\text{s}$	a
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

^a To be specified by the relevant apparatus committees.

Figura A. 1 – Classes e formas de sobretensões, formas de tensão padrão e testes de tensão suportável padrão [5].

A1.2 Exponente m para Correção de Altitude

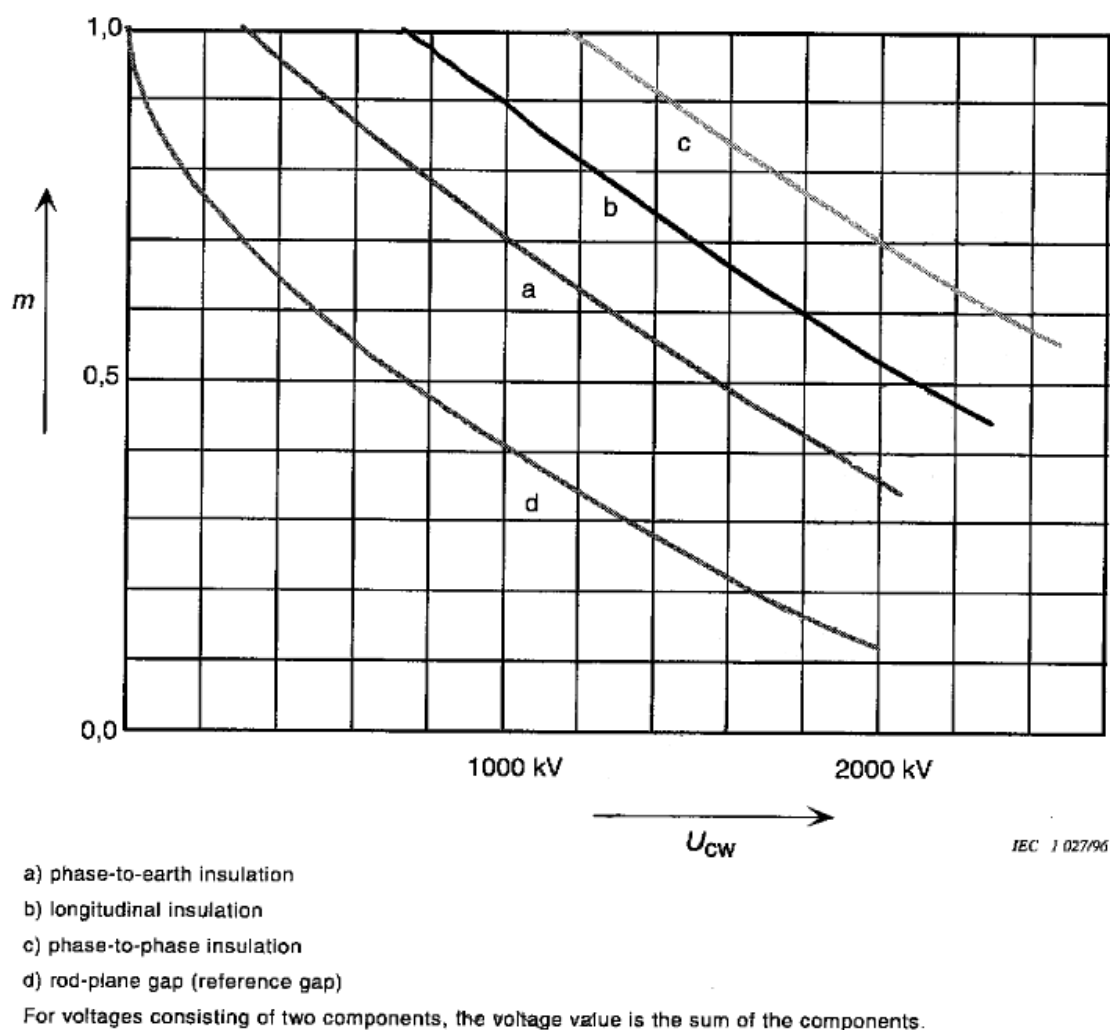


Figura A. 2 – Dependência do expoente m na tensão suportável do impulso de manobra [7].

A1.3 Valores Normalizados para as Tensões Suportáveis Nominais de Curta Duração à Frequência Industrial

Os valores seguintes, r.m.s. e em kV, são normalizados para as tensões suportáveis: **10, 20, 28, 38, 50, 70, 95, 115, 140, 185, 230, 275, 325, 360, 395, 460, 510, 570, 630, 680.**

Os valores seguintes, r.m.s. e em kV, estão sob consideração para as tensões suportáveis: **710, 790, 830, 880, 960, 975, 1050, 1100, 1200** [6].

A1.4 Valores Normalizados para as Tensões Suportáveis Nominais de Impulso

Os seguintes valores de pico, em kV, estão normalizados para as tensões suportáveis: **20, 40, 60, 75, 95, 125, 145, 170, 200, 250, 325, 380, 450, 550, 650, 750, 850, 950, 1050, 1175, 1300, 1425, 1550, 1675, 1800, 1950, 2100, 2250, 2400, 2550, 2700, 2900, 3100** [6].

A1.5 Nível de Isolamento Padrão para Classe I

Highest voltage for equipment (U_m) kV (r.m.s. value)	Standard rated short-duration power-frequency withstand voltage kV (r.m.s. value)	Standard rated lightning impulse withstand voltage kV (peak value)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5 ^a	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52 ^a	95	250
72,5	140	325
100 ^b	(150) 185	(380) 450
123	(185) 230	(450) 550
145	(185) 230 275	(450) 550 650
170 ^a	(230) 275 325	(550) 650 750
245	(275) (325) 360 395 460	(650) (750) 850 950 1050
NOTE. If values in brackets are considered insufficient to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met, additional phase-to-phase withstand voltage tests are needed.		
^a These U_m are non preferred values in IEC 60038 and thus no most frequently combinations standardized in apparatus standards are given.		
^b This U_m value is not mentioned in IEC 60038 but it has been introduced in range I in some apparatus standards.		

Figura A. 3 – Níveis de isolamento padrão para a classe I ($1\text{kV} < U_m < 245\text{kV}$) [5].

A1.6 Nível de Isolamento Padrão para Classe II

Highest voltage for equipment U_m kV (r.m.s. value)	Standard rated switching impulse withstand voltage			Standard rated lightning impulse withstand voltage ^b kV (peak value)
	Longitudinal insulation ^a kV (peak value)	Phase-to-earth kV (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value)	
300 ^c	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1 050
362	850	850	1,50	950
				1 050
	850	950	1,50	1 050
				1 175
420	850	850	1,60	1 050
				1 175
	950	950	1,50	1 175
				1 300
	950	1050	1,50	1 300
				1 425
550	950	950	1,70	1 175
				1 300
	950	1 050	1,60	1 300
				1 425
	950 1 050	1 175	1,50	1 425
				1 550
800	1 175	1 300	1,70	1 675
				1 800
	1 175	1 425	1,70	1 800
				1 950
	1 175 1 300	1 550	1,60	1 950
				2 100
1 100	—	1 425 ^d	—	1 950
				2 100
	1 425	1 550	1,70	2 100
				2 250
	1 550	1 675	1,65	2 250
				2 400
1 200	1 675	1 800	1,6	2 400
				2 550
	1 550	1 675	1,70	2 100
				2 250
	1 675	1 800	1,65	2 250
				2 400
1 800	1 950	1,60	2 550	
			2 700	

^a Value of the impulse voltage component of the relevant combined test while the peak value of the power-frequency component of opposite polarity is $U_m \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$.

^b These values apply as for phase-to-earth and phase-to-phase insulation as well; for longitudinal insulation they apply as the standard rated lightning impulse component of the combined standard rated withstand voltage, while the peak value of the power-frequency component of opposite polarity is $0,7 \times U_m \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$.

^c This U_m is a non-preferred value in IEC 60038.

^d This value is only applicable to the phase-to-earth insulation of single phase equipment not exposed to air.

Figura A. 4 – Níveis de isolamento padrão para a classe II ($U_m > 245\text{kV}$) [5].

A1.7 Distâncias no Ar

Standard rated lightning impulse withstand voltage kV	Minimum clearance mm	
	Rod-structure	Conductor-structure
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
200	380	
250	480	
325	630	
380	750	
450	900	
550	1 100	
650	1 300	
750	1 500	
850	1 700	1 600
950	1 900	1 700
1 050	2 100	1 900
1 175	2 350	2 200
1 300	2 600	2 400
1 425	2 850	2 600
1 550	3 100	2 900
1 675	3 350	3 100
1 800	3 600	3 300
1 950	3 900	3 600
2 100	4 200	3 900
2 250	4 500	4 150
2 400	4 800	4 450
2 550	5 100	4 700
2 700	5 400	5 000

NOTE The standard rated lightning impulse withstand voltages are applicable phase-to-phase and phase-to-earth.

For phase-to-earth, the minimum clearance for conductor-structure and rod-structure is applicable.

For phase-to-phase, the minimum clearance for rod-structure is applicable.

Figura A. 5 – Correlação entre tensões suportáveis ao impulso atmosférico padrão e distâncias mínimas no ar [6].

Standard rated switching impulse withstand voltage kV	Minimum phase-to-earth clearance mm	
	Rod-structure	Conductor-structure
750	1 900	1 600
850	2 400	1 800
950	2 900	2 200
1 050	3 400	2 600
1 175	4 100	3 100
1 300	4 800	3 600
1 425	5 600	4 200
1 550	6 400	4 900
1 675	7 400 ^a	5 600 ^a
1 800	8 300 ^a	6 300 ^a
1 950	9 500 ^a	7 200 ^a
^a Tentative values still under consideration.		

Figura A. 6 – Correlação entre tensões suportáveis ao impulso de manobra padrão e distâncias mínimas, fase-terra, no ar [6].

Standard rated switching impulse withstand voltage			Minimum phase-to-phase clearance mm	
Phase-to-earth kV	Phase-to-phase value Phase-to-earth value	Phase-to-phase kV	Conductor-conductor parallel	Rod-conductor
750	1,50	1 125	2 300	2 600
850	1,50	1 275	2 600	3 100
850	1,60	1 360	2 900	3 400
950	1,50	1 425	3 100	3 600
950	1,70	1 615	3 700	4 300
1 050	1,50	1 575	3 600	4 200
1 050	1,60	1 680	3 900	4 600
1 175	1,50	1 763	4 200	5 000
1 300	1,70	2 210	6 100	7 400
1 425	1,70	2 423	7 200	9 000
1 550	1,60	2 480	7 600	9 400
1 550	1,70	2 635	8 400 ^a	10 000 ^a
1 675	1,65	2 764	9 100 ^a	10 900 ^a
1 675	1,70	2 848	9 600 ^a	11 400 ^a
1 800	1,60	2 880	9 800 ^a	11 600 ^a
1 800	1,65	2 970	10 300 ^a	12 300 ^a
1 950	1,60	3 120	11 200 ^a	13 300 ^a
^a Tentative values still under consideration.				

Figura A. 7 – Correlação entre tensões suportáveis ao impulso de manobra padrão e distâncias mínimas, fase-fase, no ar [6].

Anexo 2: Norma IEEE C62.82.1

A2.1 Formas de Onda Padrão

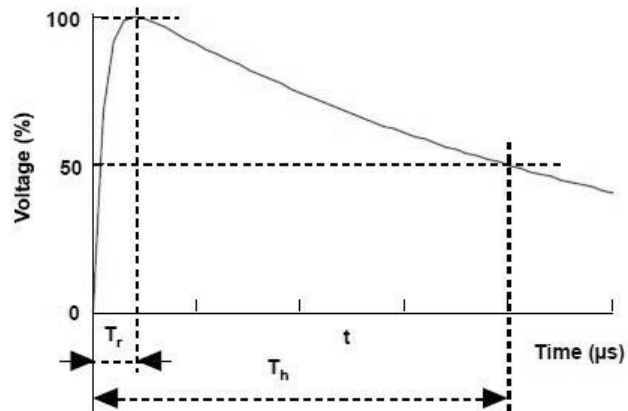


Figura A. 8 – Sobretensão de origem atmosférica ($T_r = 0.1 - 20 \mu s$, $T_h < 300 \mu s$) [9].

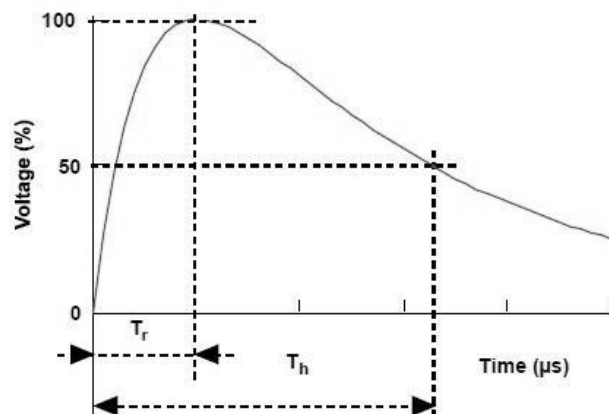


Figura A. 9 – Sobretensão de manobra ($T_r = 20 - 5000 \mu s$, $T_h < 20000 \mu s$) [9].

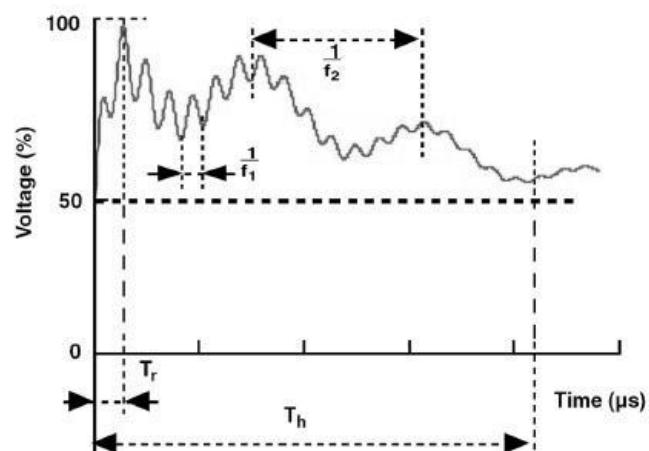


Figura A. 10 – Sobretensão de curta duração, de frente muito rápida ($T_r = 3 - 100 ns$, $T_h < 3 ms$, $f_1 = 0.3 - 100 MHz$, $f_2 = 30 - 300 kHz$) [9].

A2.2 Correção de Altitude

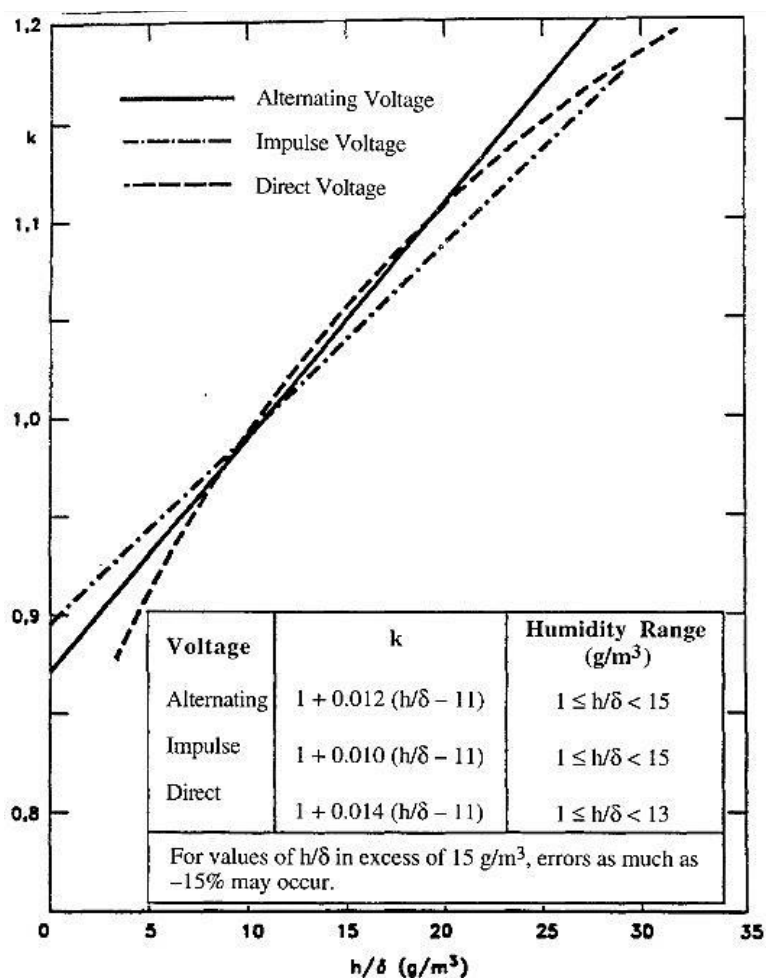


Figura A. 11 – Parâmetro k como função de h/δ [11].

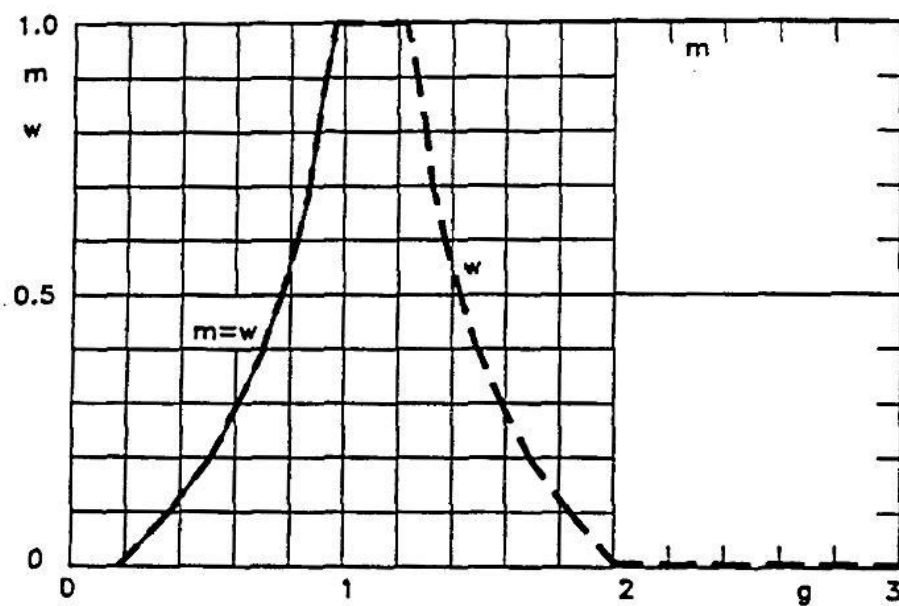


Figura A. 12 – Valores do expoente m em função de g [11].

A2.3 Tensões Suportáveis Normalizadas de Baixa Frequência e Curta Duração

Valores r.m.s. e em kV: 10, 15, 19, 26, 34, 40, 50, 70, 95, 140, 185, 230, 275, 325, 360, 395, 460, 520, 575, 630, 690, 750, 800, 860, 920, 980, 1040, 1090.

A2.4 Valores Normalizados para BIL e BSL

Valores de pico, em kV: 10, 20, 30, 45, 60, 75, 95, 110, 125, 150, 200, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 825, 850, 900, 950, 975, 1050, 1175, 1300, 1425, 1550, 1675, 1800, 1925, 2050, 2175, 2300, 2425, 2550, 2625, 2675, 2800, 2925, 3050.

A2.5 Tensões Suportáveis Padrão

Maximum system voltage (phase-to-phase) V_m kV, rms	Basic lightning impulse insulation level (phase-to-ground) BIL kV, crest	Low-frequency, short-duration withstand voltage ^a (phase-to-ground) kV, rms
15	95 110	34
26.2	125 150	40 50
36.2	150 200	50 70
48.3	250	95
72.5	250 350	95 140
121	350 450 550	140 185 230
145	450 550 650	185 230 275
169	550 650 750	230 275 325
242	650 750 825 900 975 1050	275 325 360 395 480

Figura A. 13 – Tensões suportáveis padrão para a classe I [9].

Maximum system voltage (phase-to-phase) V_m kV, rms	Basic lightning impulse insulation level (phase-to-ground) BIL kV, peak	Basic switching impulse insulation level ^a (phase-to-ground) BSL kV, peak
362	900 975 1050 1175 1300	650 750 825 900 975 1050
420	1050 1175 1300 1425	850 950 1050
550	1300 1425 1550 1675 1800	1175 1300 1425 1550
800	1800 1925 2050	1300 1425 1550 1675 1800
1200	2100 2250 2400 2550 2700	1675 1800 1950

Figura A. 14 – Tensões suportáveis padrão para a classe II [9].

Anexo 3: Apoios Utilizados pela REN

A3.1 Tipo FS – Linha Simples

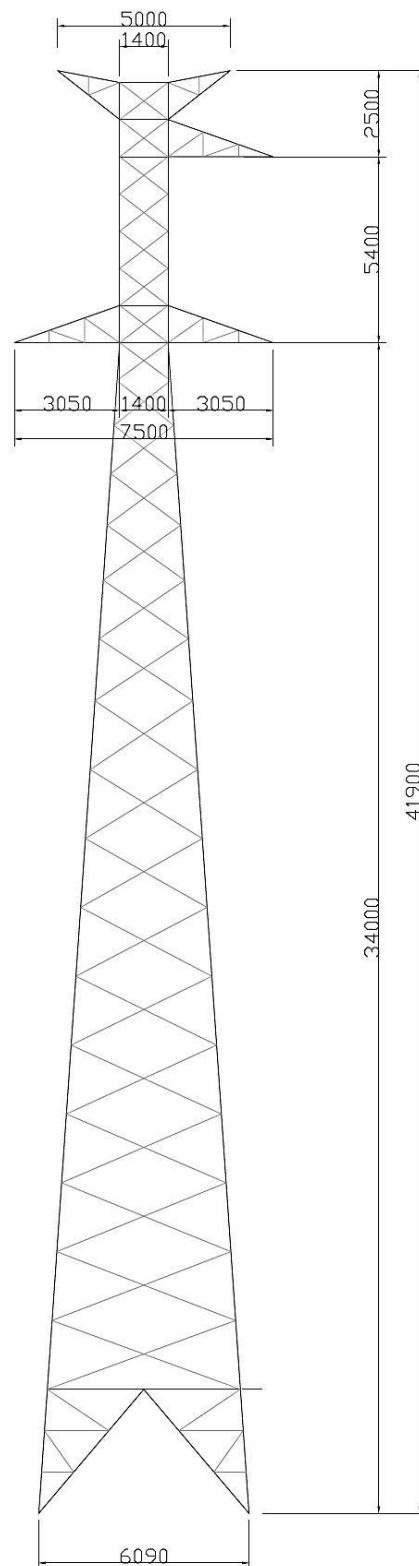


Figura A. 15 – Dimensões em milímetros do apoio FS, suspensão em triângulo, para linha simples [17].

A3.2 Tipo CWS – Linha Dupla

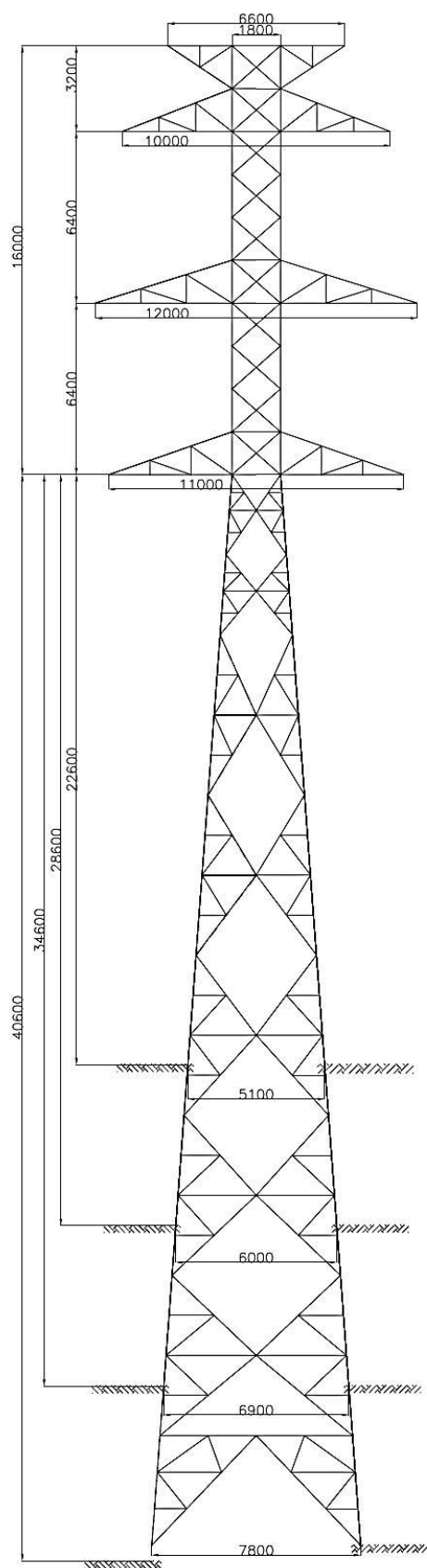


Figura A. 16 – Dimensões em milímetros do apoio CWS, suspensão em esteira vertical, para linha dupla [15].

A3.3 Tipo MT1 – Linha Simples

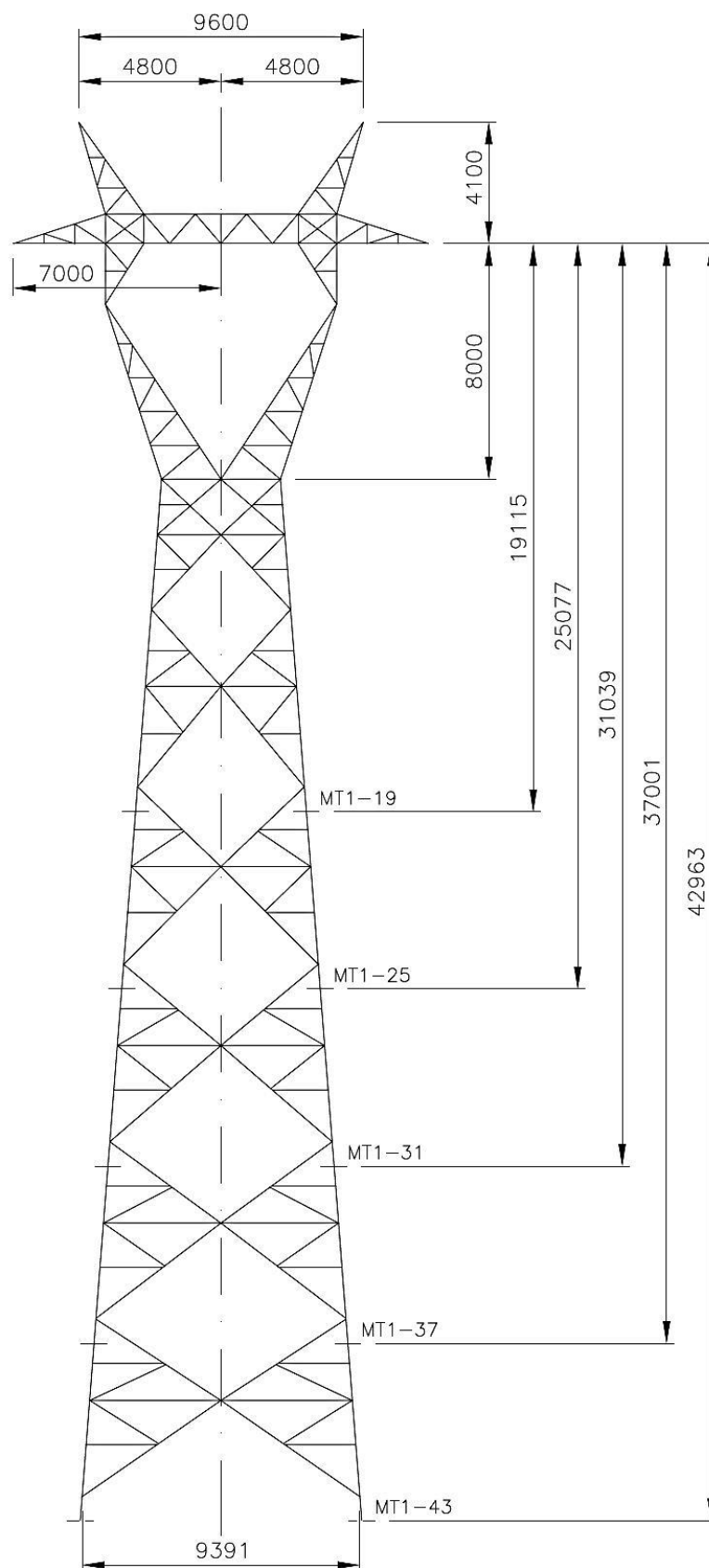


Figura A. 17 – Dimensões em milímetros do apoio MT1, suspensão em esteira horizontal, para linha simples [18].

A3.4 Tipo QS – Linha Simples

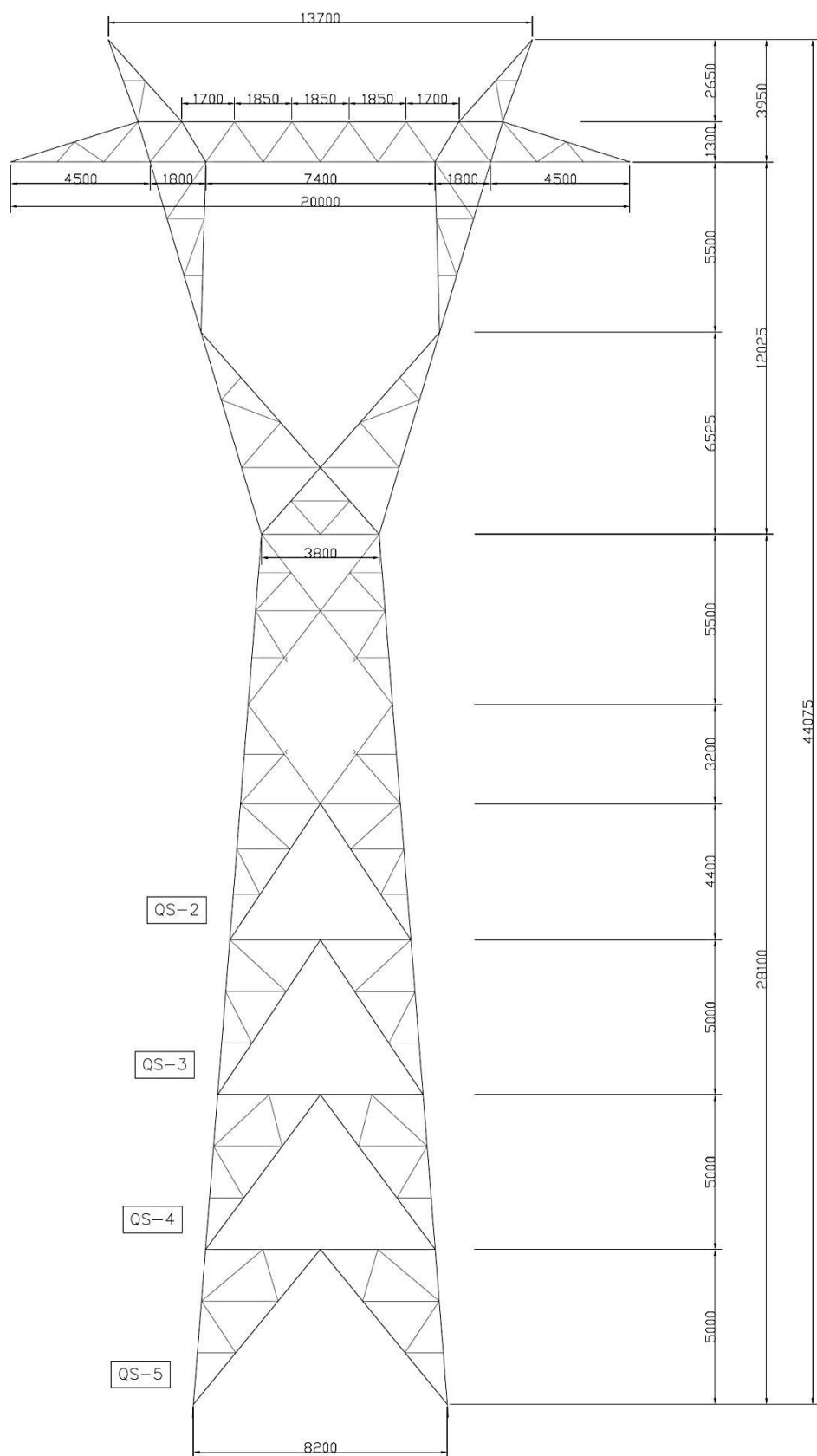


Figura A. 18 – Dimensões em milímetros do apoio QS, suspensão em esteira horizontal, para linha simples [19].

A3.5 Tipo DLS – Linha Dupla

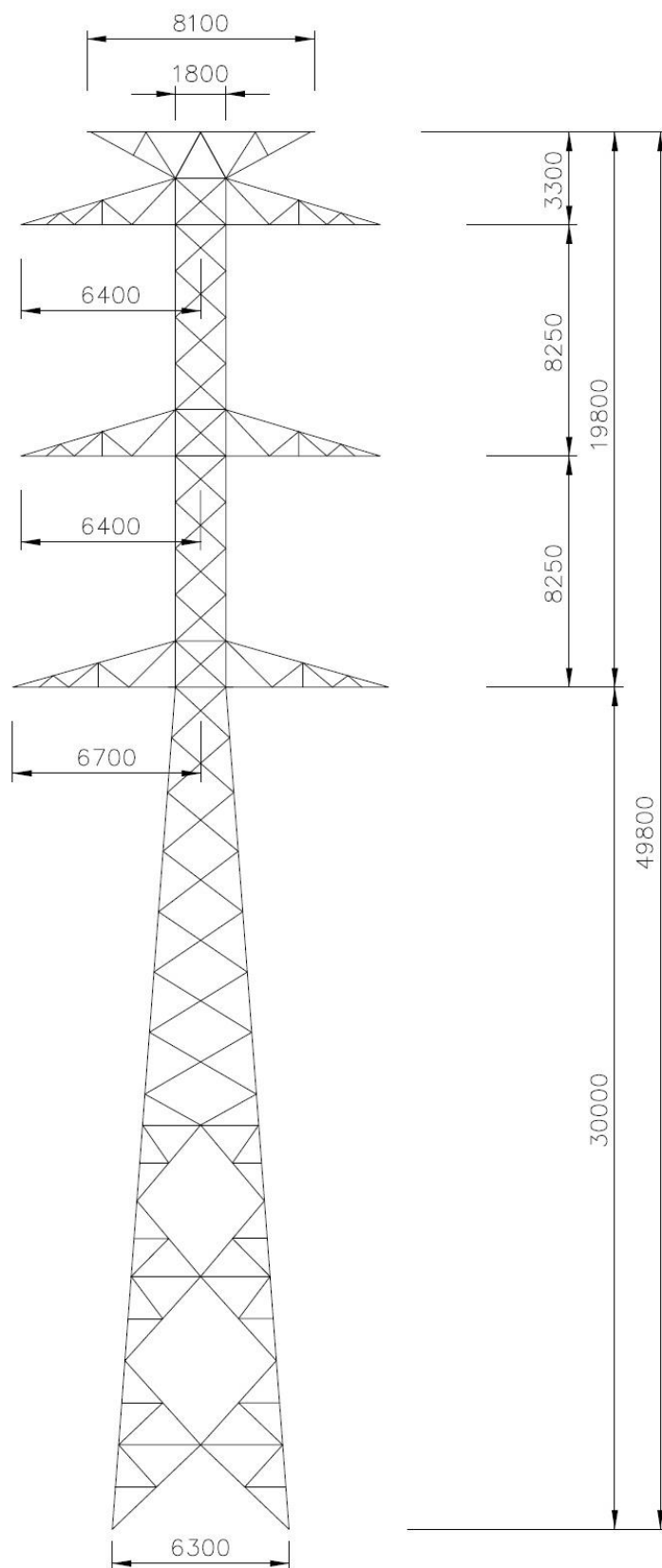


Figura A. 19 – Dimensões em milímetros do apoio DLS, suspensão em esteira vertical, para linha dupla [16].

